

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE
Enerģētikas un elektrotehnikas fakultāte
Enerģētikas institūts

Svetlana BERJOZKINA

Doktora studiju programmas „Enerģētika un elektrotehnika (virziens-Enerģētika)” doktorante

AUGSTSPRIEGUMA ELEKTROLĪNIJU OPTIMIZĀCIJAS PAŅĒMIENI

Promocijas darbs

Zinātniskais vadītājs
Dr. habil. sc. ing., profesors
A.S.SAUHATS

Zinātniskais vadītājs Dr. sc. ing., profesors E.VANZOVIČS
--

Rīga 2014



Šis darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda atbalstu projektā «Atbalsts RTU doktora studiju īstenošanai».

This work has been supported by the European Social Fund within the project «Support for the implementation of doctoral studies at Riga Technical University».

Эта работа выполнена при содействии Европейского социального фонда в рамках проекта «Поддержка развития докторантуры РТУ».

PATEICĪBA

Promocijas darbs izstrādāts Rīgas Tehniskās universitātes Enerģētikas un elektrotehnikas fakultātes (EEF) Enerģētikas institūtā.

Vislielāko pateicību autore izsaka promocijas darba vadītājam profesoram *Antanam Sauhatam* par nozīmīgu ieguldījumu promocijas darba tapšanā un bijušajam promocijas darba vadītājam profesoram *Edvīnam Vanzovičam*, kura šodien nav mūsu vidū.

Tāpat autore izsaka pateicību Enerģētikas institūta *pasniedzējiem*.

AS „Latvijas elektriskie tīkli” ekspertiem *Aldim Bangam* un *Igoram Jakuševičam* par promocijas darba eksperimentālo mērījumu veikšanu.

Darba *kolēģiem* no AS „Siltumelektroprojekts”.

Autore izsaka pateicību *Tālivaldim Aristovam* par praktisko palīdzību pirmā zinātniskā raksta tapšanā un par iedrošināšanu un pārliecināšanu par manām spējām studēt doktorantūrā.

Liels paldies *ģimenei* par atbalstu, sapratni un iecietību visa promocijas darba tapšanas laikā.

ANOTĀCIJA

Sakarā ar elektropārvades tīkla jauno elektrisko savienojumu realizāciju, atjaunojamo energoresursu lielo ietekmi, enerģijas tirgus liberalizāciju un jauno atomelektrostaciju celtniecību, būtiski palielināsies Baltijas pārvades tīklu tranzīta jaudas plūsmas. Rezultātā par aktuālu kļūst esošā tīkla elektrisko savienojumu paplašināšanas un tehniskās modernizācijas jautājums, kas saistīts ar izmantojamo elektropārvades līniju caurlaides spējas nepietiekamību to fizisko un funkcionālo (morālo) novecošanās dēļ. Līdz ar to nepieciešams izstrādāt, realizēt un ievest esošajā elektropārvades tīklā jaunas tehnoloģijas, kas ļaus pielāgoties dinamiski operatīvai elektrolīniju kontrolei un vadībai reālajā laika režīmā. Turklāt mūsdienas enerģētikas attīstība un „viedo” tīklu globalizācijas tendences veicina modernizēt pastāvošus gaisvadu elektrolīnijas projektēšanas optimizācijas uzdevumus, to formulējumu, algoritmus un realizācijas iespējas, ievērojot pastāvošo ierobežojumu un nenoteikto parametru ietekmi – daudz mērķtiecīgu uzdevumu rašanās. Ņemot vērā iepriekš minētos apsvērumus, par aktuālu kļūst promocijas darba izvirzīto problēmu izskatīšana, kas veicinās „mākslīgas” tīkla jaudas palielināšanas iespējas, izmantojot izstrādātus tehniski ekonomiskus pasākumus.

Pielāgojoties viedo tīklu koncepcijai, elektropārvades tīklu attīstības jautājumu un augstsprieguma gaisvadu elektrolīniju caurlaides spējas palielināšanas problēmu kompleksas aplūkošanas nepieciešamība izvirza promocijas darba galveno mērķi – attīstīt energosistēmu ekonomiskās efektivitātes un drošuma līmeņa paaugstināšanu, kā arī kaitīgas ietekmes uz vidi samazināšanu. Šādu tehnisko pasākumu pamatojums balstās uz elektrolīniju termiskās strāvas monitoringa sistēmas sintezēto algoritmu un augsttemperatūras vadu ar kompozītmateriālu serdeni izmantošanas (ieviešanas) iespēju un realizāciju, kā arī uz daudzkritēriju līniju optimizācijas uzdevuma nostādni ar Pareto pieejas un scenāriju pieejas izmantošanu galīga lēmuma pieņemšanai un elektrolīniju sintezēto kapitālieguldījumu sadales metodi. Rezultātā minētie tehniski-ekonomiskie pasākumi ļaus palielināt līniju caurlaides spēju vairākuma režīmos un izvēlēties vispiemērotāko no tām, kā arī palielināt energosistēmas drošumu, samazināt ietekmi uz apkārtējo vidi, iegūstot līnijas optimizācijas uzdevuma efektīvu risinājumu – mazākas investīcijas pie izvirzīto tehnisko pasākumu realizēšanas.

Promocijas darba rezultāti tika ziņoti un pozitīvi novērtēti dažādu līmeņu starptautiskās konferencēs; atspoguļoti starptautiski referējamajos zinātniskos žurnālos, zinātnisko rakstu krājumos, kā arī praktiski realizēti starptautiskos un valsts projektos.

ANNOTATION

As a result of the implementation of the new electrical connections of the power transmission grid, the large impact of renewable energy resources, the liberalization of the energy market and the construction of a new nuclear power plant, the transit power flows of the Baltic transmission networks will increase considerably. As a result, it will be necessary to expand the existing electrical connections of the existing network, which in turn will lead to insufficient throughput capacity of the power transmission lines in use due to wear, tear and obsolescence. This makes it necessary to develop, implement and introduce into the existing power transmission network new technologies, which will make it possible to adapt to dynamically operative monitoring and control of power lines in real time mode. Besides, the contemporary situation in the development of the power industry as well as the smart grid globalization tendencies provide a stimulus for the modernization of the existing overhead power line designing optimization tasks, their formulation, algorithms and implementation possibilities, considering the influence of the existing limitations and the indeterminate parameters: a number of clear tasks emerge. In view of the above considerations, it is becoming topical to look at the problems set in the present thesis, which will foster the possibilities for “artificially” increasing the network load capacity by using the developed technical and economic measures.

Adapting to the concept of smart grids, the need for complex consideration of power grid development issues and issues related to increasing the throughput capacity of a high-voltage overhead power line set the main goal of the present thesis, namely, to develop the increase of the economic efficiency and reliability level of power systems and the diminishing of harmful environmental impact. The substantiation of such technical measures is based on the possibility to use and implement synthesized algorithm of the thermal rating monitoring system as well as high-temperature composite core conductors; formulation of a multicriterial line optimization task by using Pareto’s approach and the scenario approach for the final decision and the synthesized capital investment distribution method for power lines. As a result, the above technical and economic measures will make it possible to increase the throughput capacity of lines at most sets of conditions and use the most suited one, as well as to increase the reliability of a power system, to diminish its environmental impact, thus arriving at an efficient solution of the line optimization task: smaller investments while implementing the set measures.

The results of the present paper have been presented and have received positive evaluations at international conferences of various levels; reflected at internationally reference able scientific magazines, collections of studies; practically implemented within international and national projects.

АННОТАЦИЯ

В связи с реализацией новых электрических соединений сети электропередачи, большого влияния возобновляемых энергоресурсов, либерализации рынка энергии и строительства новых атомных электростанций придвидится значительное увеличение транзитных потоков мощности Балтийских сетей электропередачи. В результате актуальным становится вопрос о необходимости расширения электрических соединений и технического перевооружения существующей сети, вызванное недостаточной пропускной способности используемых линий электропередачи, в связи с их физическим и функциональным (моральным) износом. Вместе с тем необходимо разработать, реализовать и внедрить в существующую сеть электропередачи новые технологии, которые позволят приспособиться к динамически оперативному контролю и управлению электролиниями в режиме реального времени. К тому же, современное развитие энергетики и тенденции глобализации «интеллектуальных» сетей стимулируют необходимость модернизации существующих задач оптимизации проектирования воздушных электролиний, их формулировку, алгоритмы и возможности реализации, с учётом влияния существующих ограничений и неопределённых параметров – возникает много целенаправленных задач. Принимая во внимание вышеупомянутые соображения, актуальность приобретает рассмотрение проблем, выдвинутых в диссертации, которые будут способствовать возможности «искусственного» увеличения мощности сети с использованием разработанных технико-экономических мероприятий.

Адаптируясь к концепции «интеллектуальных» сетей, необходимость в комплексном рассмотрении проблем увеличения пропускной способности высоковольтных воздушных электролиний и вопросов развития сетей электропередачи выдвигает основную цель работы – развить повышение экономической эффективности и уровня надежности энергосистем, а также уменьшение отрицательного влияния на окружающую среду. Обоснования таких технических мероприятий основаны на возможности использования (внедрения) и реализации синтезированного алгоритма систем мониторинга токовой нагрузки электролиний и высокотемпературных проводов с композитным сердечником, а также на постановке многокритериальной задачи оптимизации линий с использованием подхода Парето и сценарного подхода для принятия окончательного решения и синтезированного метода распределения капитальных вложений для электролиний. В результате вышеупомянутые технико-экономические мероприятия позволят увеличить пропускную способность линий в большинстве режимов и выбрать наиболее подходящий из них, а также увеличить надёжность энергосистемы, уменьшить воздействие на окружающую среду, получая эффективное решение задачи оптимизации линии – меньшие инвестиции при реализации выдвинутых мероприятий.

Полученные результаты диссертации были предоставлены и получили положительную оценку на международных конференциях различного уровня; отражены в международно реферируемых научных журналах, сборниках научных трудов, а также практически реализованы в международных и государственных проектах.

SATURS

PATEICĪBA	3
ANOTĀCIJA	4
ANNOTATION	5
АННОТАЦИЯ.....	6
SATURS.....	7
Saīsinājumu un akronīmu saraksts	10
Attēlu saraksts	13
Tabulu saraksts.....	16
IEVADS	17
1. AUGSTSPRIEGUMA ELEKTROLĪNIJU OPTIMIZĀCIJAS UZDEVUMA FORMULĒJUMS, IZMANTOJAMĀS METODES UN RĪKI	26
1.1. GEL loma energosistēmās	26
1.1.1. Pašreizējā situācija pasaulē.....	26
1.1.2. Pašreizējā situācija Latvijā	28
1.2. Augstsprieguma elektrolīniju konstrukcijas, parametri, ierobežojumi un cenas	34
1.2.1. GEL konstruktīvie elementi un parametri	34
1.2.1.1. GEL pielietojamie vadi un aizsargtrošes.....	34
1.2.1.2. GEL pielietojamie balsti	35
1.2.1.3. GEL pielietojamie izolatori.....	36
1.2.1.4. Pielietojamā līniju armatūra	37
1.2.1.5. GEL balstu pamati.....	37
1.2.1.6. GEL zibensaizsardzība un zemēšanas ietaises	37
1.2.1.7. GEL galvenie konstruktīvie parametri	37
1.2.2. GEL būvniecības galvenie ierobežojumi.....	38
1.2.3. GEL izbūves izmaksas	39
1.3. Jaunās tehnoloģijas GEL projektos.....	40
1.3.1. Jauno tehnoloģiju galvenie virzieni	42
1.3.2. Pasīvo iekārtu pārskats	43
1.3.2.1. XLPE pazemes kabeļi	44
1.3.2.2. GIL	44
1.3.2.3. HTS kabeļi	44
1.3.2.4. HTLS vadi	45
1.3.2.5. HVAC līnijas, kas aprīkotas ar inovatīviem balstiem	47
1.3.3. Aktīvo iekārtu pārskats.....	48
1.3.3.1. PST	48
1.3.3.2. FCL	48
1.3.3.3. HVDC	48
1.3.3.4. FACTS	49
1.3.4. Reāllaika tehnoloģijas apskats.....	50
1.3.5. PSO darbību ietekmējošo iekārtu pārskats	51
1.4. GEL projektēšanas metodes un rīki	51
1.4.1. GEL projektēšanas metodes	51
1.4.2. GEL projektēšanas rīki	53
1.5. Pastāvošās GEL optimizācijas pieejas	56

1.5.1. GEL optimizācijas uzdevuma formulējuma nepieciešamība	56
1.5.2. GEL optimizācijas uzdevumā izmantojamās noteikšanas pieejas.....	57
1.6. Investīciju projekta novērtēšanas metodes	60
1.7. GEL režīmu vadības iespējas un algoritmi	62
1.7.1. Ģenerējošo jaudu un GEL jaudu sadalījumu režīmu regulēšana.....	62
1.7.2. Patērētāju slodzes regulēšana	64
1.7.3. FACTS iekārtu izmantošana.....	65
1.7.4. Jaunu automātikas ierīču izmantošana GEL un monitoringa sistēmu ieviešana	65
1.8. Augstsprieguma elektrolīniju ietekme uz vidi	68
1.8.1. Vispārīgas ziņas.....	68
1.8.2. Galvenie EPL vidi ietekmējošie faktori.....	68
1.9. Secinājumi	69
2. AUGSTSPRIEGUMA LĪNIJU OPTIMIZĀCIJAS UZDEVUMA MATEMĀTISKAIS FORMULĒJUMS.....	71
2.1. Pamatpieejas uzdevuma nostādne.....	71
2.2. Varbūtiskie un nenoteiktie parametri un to ietekme	71
2.3. Mērķa funkcijas un ierobežojumi	72
2.4. Scenāriju un Pareto pieeja.....	74
2.5. Optimizācijas uzdevuma atrisināšanas algoritms un metode	77
2.6. Koalīciju dibināšana un Šeplija sadalījums	78
2.6.1. Spēļu teorijas pieeja GEL plānošanas uzdevumos	78
2.6.2. Peļņas sadale starp koalīcijas dalībniekiem – Šeplija vērtība.....	80
2.7. Secinājumi	81
3. IEROBEŽOJUMU MODEĻI, TO VERIFIKĀCIJA UN VADĪBA	82
3.1. GEL parametru eksperimentālā pārbaude.....	82
3.1.1. GEL termiskās monitoringa sistēmas galvenie parametri	82
3.1.2. Esošo GEL galveno parametru mērījumu rezultāti	84
3.1.2.1. GEL LNr. 600	84
3.1.2.2. GEL LNr. 501, LNr. 321, LNr. 303	87
3.2. Modeļu verifikācijas rezultāti	89
3.2.1. GEL pieļaujamās slodzes strāvas monitoringa sistēmas verifikācijas modeļi, izmantojot mērījumu rezultātus.....	89
3.2.1.1. GEL LNr. 600	89
3.2.1.2. GEL LNr. 501	94
3.2.1.3. GEL LNr. 501, LNr. 321 un LNr. 303	97
3.2.2. GEL pieļaujamās slodzes strāvas monitoringa sistēmas verifikācijas modeļi, izmantojot skaitļošanas rezultātus	101
3.3. Esošo GEL vadu nomaiņas un režīmu vadības iespējas	107
3.3.1. GEL termiskā monitoringa sistēma	107
3.3.2. Esošo GEL vadu nomaiņa	110
3.4. Secinājumi	112

4. GEL PROJEKTĒŠANAS PIEMĒRI UN REZULTĀTI.....	114
4.1. Projekts „Kurzemes loks”	114
4.1.1. Ievads.....	114
4.1.2. Projekta KL tehniskais pamatojums	115
4.1.3. Projekta izejas dati, galvenie parametri un konstrukcijas.....	119
4.1.3.1. Projektēšanas klimatiskie apstākļi.....	119
4.1.3.2. Vadi un aizsargtrošes	119
4.1.3.3. Līniju armatūra.....	120
4.1.3.4. Balsti un pamati.....	120
4.2. Augsttemperatūras vadu izmantošanas perspektīvas un iespējas	121
4.2.1. GEL aprēķina piemērs, kas balstās uz nozarojuma uz a/st. „Aizpute” 110 kV EPL projektu, kas iekļauts „Kurzemes loka” projekta 1. posmā	121
4.2.1.1. Izejas dati un aprēķina nosacījumi	121
4.2.1.2. Vadu tehniskā salīdzinājuma rezultāti	123
4.2.1.3. Vadu ekonomiskā salīdzinājuma rezultāti	127
4.2.1.4. Secinājumi.....	130
4.2.2. GEL aprēķina piemērs, kas balstās uz esošo 330 kV GEL LNr. 355.....	131
4.2.2.1. Izejas dati un aprēķina nosacījumi	131
4.2.2.2. Vadu tehniskā salīdzinājuma rezultāti	132
4.2.2.3. Vadu ekonomiskā salīdzinājuma rezultāti	133
4.2.2.4. Secinājumi.....	134
4.3. Projekta „Kurzemes loks” (1. posms), kas ietver 330/110 kV GEL būvi, optimizācijas rezultāti	135
4.3.1. GEL optimizācijas piemērs, daļēji balstoties uz stohastiskās pieejas un spēļu teorijas kritērijiem ar Pareto un scenāriju pieejas izmantošanu	135
4.3.2. GEL optimizācijas piemērs ar koalīcijas dibināšanas iespēju	142
4.4. Secinājumi	144
5. SECINĀJUMI UN REKOMENDĀCIJAS TURPMĀKAM DARBAM.....	146
5.1. Kopējie secinājumi	146
5.2. Rekomendācijas turpmākam darbam.....	148
PIELIKUMI	150
LITERATŪRA.....	163

Saīsinājumu un akronīmu saraksts

<i>Saīsinājums/ akronīms</i>	<i>Nosaukums</i>
ACCC	Aluminium Conductor Composite Core (<i>latviešu valodā: alumīnija vads ar kompozītmateriāla serdeni</i>)
ACCR	Aluminium Conductor Composite Reinforced (<i>latviešu valodā: pastiprināts alumīnija vads ar kompozītmateriāla serdeni</i>)
ACSR	Aluminium Conductor Steel Reinforced (<i>latviešu valodā: pastiprināts tēraudalumīnija vads</i>)
AES	Atomelektrostacija
AEKUS	Automatizētā elektroenerģijas kontroles un uzskaites sistēma
AS	Aluminium Steel Conductor (<i>latviešu valodā: tēraudalumīnija vads</i>)
AVR	Automatic Voltage Regulator (<i>latviešu valodā: automātisks sprieguma regulators</i>)
AVS	Automatizētā vadības sistēma
a/st.	Apakšstacija
CAES	Compressed Air Energy Storage (<i>latviešu valodā: saspiestā gaisa enerģijas uzglabāšana</i>)
DTCR	Dynamic Thermal Circuit Rating system (<i>latviešu valodā: dinamiskā termiskās strāvas monitoringa sistēma</i>)
DFC	Dynamic Flow Controller (<i>latviešu valodā: energoplūsmu dinamiskā vadības sistēma</i>)
EPL	Elektropārvades līnija
EMS	Energy Management System (<i>latviešu valodā: enerģijas vadības sistēma</i>)
EML	Elektromagnētiskais lauks
EL	Elektriskais lauks
ET	Elektriskais tīkls
EPT	Elektropārvades tīkls
ER	Efektivitātes rādītājs
EUR	Eiro
ESM	Elektroniskā skaitļošanas mašīna
FACTS	Flexible Alternating Current Transmission System (<i>latviešu valodā: elastīga maiņstrāvas pārvades sistēma</i>)
FCL	Fault Current Limiter (<i>latviešu valodā: īsslēguma strāvas ierobežotājs</i>)
FES	Flywheel Energy Storage (<i>latviešu valodā: spārara enerģijas uzglabāšana</i>)
GEL	Gaisvadu elektrolīnija
GIL	Gas Insulated Line (<i>latviešu valodā: gāzizolētā līnija</i>)
GTACSR	Gap Construction Thermal Resistant Aluminium Alloy Conductor Steel Reinforced
GPS	Global Positioning System (<i>latviešu valodā: globālā pozicionēšanas sistēma</i>)
gab.	gabals

HVAC	High Voltage Alternating Current (<i>latviešu valodā: augstsprieguma maiņstrāva</i>)
HVDC	High Voltage Direct Current (<i>latviešu valodā: augstsprieguma līdzstrāva</i>)
HTS	High Temperature Superconducting cable (<i>latviešu valodā: augsttemperatūras kabelis</i>)
HES	Hidroelektrostacija
HTLS	High Temperature Low Sag Conductor (<i>latviešu valodā: augsttemperatūras mazas nokares vads</i>)
ITO	Impacting TSOs' Operations equipment (<i>latviešu valodā: PSO darbību ietekmējošā iekārta</i>)
IPFC	Interline Power Flow Controller (<i>latviešu valodā: starp saites jaudas plūsmu vadības sistēma</i>)
IRR	Internal Rate of Return (<i>latviešu valodā: iekšējās rentabilitātes norma</i>)
IFOV	Instantaneous field of view (<i>latviešu valodā: momentāns redzeslauks</i>)
KL	„Kurzemes loks”
LTS	Low temperature superconducting cable (<i>latviešu valodā: zemas temperatūras kabelis</i>)
LPP	Lēmumu pieņemšanas persona
LA	Laika apstākļi
ML	Magnētiskais lauks
MIRR	Modified IRR (<i>latviešu valodā: modificētā rentabilitātes norma</i>)
Na-S batteries	Sodium-Sulphur batteries (<i>latviešu valodā: nātrija-sēra baterijas</i>)
NPV	Net Present Value (<i>latviešu valodā: Neto tagadnes vērtība</i>)
OPGW	Optical ground wire (<i>latviešu valodā: optisko šķiedru kabelis</i>)
PA	Pretavārijas automātika
PP	Projekta atmaksāšanas periods
PI	Profitability Index (<i>latviešu valodā: peļņas norma vai rentabilitātes indekss</i>)
PST	Phase Shifting Transformer (<i>latviešu valodā: sprieguma šķērsregulēšanas transformators</i>)
PMU	Phasor Measurement Unit network (<i>latviešu valodā: fāzes mērīšanas ierīču tīkls</i>)
PHS	Pumped Hydroelectric Storage (<i>latviešu valodā: sūkņēšanas hidroelektriskā uzglabāšana</i>)
PSS	Power System Stabilizer (<i>latviešu valodā: energosistēmas stabilizators</i>)
PTK	Programmu un tehniskais komplekss
PSO	Pārvades sistēmas operators
RT	Real Time system monitoring equipment (<i>latviešu valodā: reāllaika sistēmu monitoringa iekārta</i>)
RTTR	Real Time Thermal Rating controlled lines (<i>latviešu valodā: reāllaika termiskās strāvas regulējamas līnijas</i>)
RAA	Relejaizsardzības un automātika

RA	Relejaizsardzība
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition (<i>latviešu valodā: dispečervadība un datu vākšana</i>)
SMES	Superconducting Magnetic Energy Storage (<i>latviešu valodā: supravadīspējas magnētiskā enerģijas uzglabāšana</i>)
SVC	Static Var Compensator (<i>latviešu valodā: statiskais reaktīvas jaudas kompensators</i>)
STATCOM	Static Synchronous Compensator (<i>latviešu valodā: statiskais sinhronais kompensators</i>)
ST	Sadales tīkls
SSSC	Static Synchronous Series Compensator (<i>latviešu valodā: statiskais sinhronais garenkompensators</i>)
sk.	skatīt
TES	Termoelektrostacija
TS	Tehniskā specifikācija
TCSC	Thyristor Controlled Series Capacitor (<i>latviešu valodā: kondensatoru baterija ar tiristora vadību</i>)
TCPST	Thyristor Controlled Phase Shifting Transformer (<i>latviešu valodā: sprieguma šķērsregulēšanas transformators ar tiristora vadību</i>)
TEM	Tehniski ekonomiskais modelis
TP AVS	Tehnoloģiskā procesa automatizētā vadības sistēma
t.i.	tas ir
UPFC	Unified Power Flow Controller (<i>latviešu valodā: energoplūsmu unificēta vadības sistēma</i>)
u.c.	un citi
VT	Viedie tīkli (<i>angļu valodā: Smart Grid</i>)
VAAI	Vienfāzes automātiskā atkalieslēgšana
WAMC	Wide Area Monitoring and Control System (<i>latviešu valodā: globālā monitoringa un vadības sistēma</i>)
XLPE	Cross-Linked Polyethylene underground cable (<i>latviešu valodā: sašūtā polietilēna pazemes kabelis</i>)

Attēlu saraksts

1.1. att.	Atjaunojamo enerģijas avotu potenciāls Eiropā	27
1.2. att.	Baltijas energosistēmu jaunie elektriskie savienojumi	27
1.3. att.	EPT attīstība	29
1.4. att.	Latvijas 330 – 110 kV EPT shēmas variants līdz 2013. g.	31
1.5. att.	Latvijas 330 – 110 kV EPT shēmas variants līdz 2018. g.	32
1.6. att.	GEL vadi un aizsargtrošes: a) tēraudalumīnija kailvadi; b) tērauda trose; c) OPGW; d) HTLS	35
1.7. att.	GEL balsti: a) enkurbalsts; b) starpbalsts; c) stūra balsts; d) gala balsts; e) nozarbalsts; f) pārejas balsts	36
1.8. att.	GEL piekarizolatori: a) stikla; b) polimēra; c) porcelāna	37
1.9. att.	GEL vadu visvairāk ietekmējošie faktori	39
1.10. att.	a) ACCC vada; b) ACCR vada; c) GTACSR vada šķērsgriezums	46
1.11. att.	HTLS vadu tipu temperatūras-nokares atkarības raksturojums	47
1.12. att.	Videi draudzīgas balstu konstrukcijas	47
1.13. att.	Reāllaika tehnoloģijas: a) <i>Video Sagometer</i> ; b) PMU; c) GEL strāvas monitoringa sistēma	50
1.14. att.	GEL projektēšanas nosacītās stadijas	51
1.15. att.	PLS-CADD datorprogrammas interfeisa skats	55
1.16. att.	GEL projektēšanas datorprogrammas pamatskice	55
1.17. att.	Pamatuzdevuma risinājumu optimālā varianta izvēles shēma	58
1.18. att.	Uzdevuma datorizētā risinājuma etapi	59
1.19. att.	GEL optimizācijas mērķa grafiskā ilustrācija	60
1.20. att.	Energosistēmas vadība: a) tradicionāla, kas balstās uz vienu lokālo atgriezeniskās saites signālu; b) attīstības tendences metode, kas ietver sevī pāreju no atgriezeniskās saites, apstrādājot papildinformāciju, kas nonāk no telemetriju kanāliem	63
1.21. att.	GEL pamatietekmējošo apakšsistēmu definējums	68
2.1. att.	Optimizācijas uzdevuma atrisināšanas algoritma blokshēma	78
3.1. att.	Izmantojamās monitoringa ierīces	83
3.2. att.	LNr. 600 elektriskās shēmas daļa (a); enkurlaiduma daļa starp balstu Nr. 1 un a/st. „Jāņciems” (b); enkurlaiduma daļa starp balstiem Nr. 1 un Nr. 2 (c)	85
3.3. att.	Eksperimentālie rezultāti GEL LNr. 600 laidumam starp balstiem Nr. 1 un Nr. 2: gadījumam A 1. un 3. fāzei (a); gadījumam B 1. un 3. fāzei (b); gadījumam C 1. un 3. fāzei (c)	86
3.4. att.	Daļa no GEL LNr. 501, LNr. 321, LNr. 303 elektriskās shēmas	87
3.5. att.	Eksperimentālie rezultāti GEL LNr. 501 laidumam starp balstiem Nr. 53 un Nr. 54	88

3.6. att.	Eksperimentālie rezultāti GEL LNr. 321 laidumam starp balstiem Nr. 17 un Nr. 18 -90	88
3.7. att.	Eksperimentālie rezultāti GEL LNr. 303 laidumam starp balstiem Nr. 59 un Nr. 60	89
3.8. att.	Iegūtie aprēķinu rezultāti, balstoties uz esošās LNr. 600 eksperimentāliem datiem gadījumam B: a) vada stacionārās temperatūras; b) vada nokares	91
3.9. att.	Iegūtie aprēķinu rezultāti, balstoties uz esošās LNr. 600 eksperimentāliem datiem gadījumam A: a) vada stacionārās temperatūras; b) vada nokares	93
3.10. att.	Iegūtie aprēķinu rezultāti, balstoties uz esošās LNr. 600 eksperimentāliem datiem gadījumam C: a) vada stacionārās temperatūras; b) vada nokares	94
3.11. att.	Iegūtie aprēķinu rezultāti, balstoties uz esošās LNr. 501 eksperimentāliem datiem: a) vada stacionārās temperatūras; b) vada nokares	95
3.12. att.	LNr. 501 slodzes strāvas vērtības (I_1 , I_2) atkarībā no vēja ātruma, pieļaujamās un mērījumos noteiktās vada temperatūras gaisa temperatūrā 36 °C	98
3.13. att.	LNr. 501 noslodze atkarībā no vēja ātruma, pieļaujamās un vada fāžu mērījumos noteiktajām temperatūrām un gaisa temperatūras 36 °C, reducējot to uz vada faktisko izmērīto slodzes strāvu ($I_m = 230$ A)	98
3.14. att.	LNr. 321 slodzes strāvas vērtības (I_1 , I_2) atkarībā no vēja ātruma, pieļaujamās un mērījumos noteiktās vada temperatūras gaisa temperatūrā 30 °C	99
3.15. att.	LNr. 321 noslodze atkarībā no vēja ātruma, pieļaujamās un vada fāžu mērījumos noteiktajām temperatūrām gaisa temperatūrā 30 °C, reducējot to uz vada faktisko izmērīto slodzes strāvu ($I_m = 429$ A)	99
3.16. att.	LNr. 303 slodzes strāvas vērtības (I_1 , I_2) atkarībā no vēja ātruma, pieļaujamās un mērījumos noteiktās vada temperatūras gaisa temperatūrā 19 °C	100
3.17. att.	LNr. 303 noslodze atkarībā no vēja ātruma, pieļaujamās un vada fāžu mērījumos noteiktajām temperatūrām gaisa temperatūrā 19 °C, reducējot to uz vada faktisko izmērīto slodzes strāvu ($I_m = 438$ A)	100
3.18. att.	Aplūkojamo GEL vadu nokares un gabarīti	101
3.19. att.	Esošās GEL LNr. 309 elektriskā shēma	102
3.20. att.	Pētījuma koncepcija	104
3.21. att.	Vada pieļaujamās temperatūras atkarībā no termiskā ierobežojuma – vada temperatūras un mehāniskā ierobežojuma – gabarīta	105
3.22. att.	Vada maksimālā slodzes strāva, balstoties uz pamatnosacījumiem: a) pirmajam variantam; b) otrajam variantam	106
3.23. att.	DTCR darbības princips	108
3.24. att.	Termiskās monitoringa sistēmas sintezēta algoritma koncepcija	110
4.1. att.	Projekta „Kurzemes loks” plāns	115
4.2. att.	Esošā 110 kV principiālā elektriskā shēma	117
4.3. att.	110 kV un 330 kV principiālās elektriskās shēmas pēc rekonstrukcijas	118

4.4. att.	Mehāniskā sprieguma vadā un GEL laiduma garuma attiecība režīmā ar vada sasilšanu līdz pie +35°C dažādajiem vadu tipiem līnijas LNr.266 analīzei	124
4.5. att.	Mehāniskā sprieguma vadā un GEL laiduma garuma attiecība režīmā ar vada sasilšanu līdz +70°C dažādajiem vadu tipiem līnijas LNr. 266 analīzei	124
4.6. att.	Vada nokares un GEL laiduma garuma attiecība režīmā ar vada sasilšanu līdz +35°C dažādajiem vadu tipiem līnijas LNr. 266 analīzei	125
4.7. att.	Vada nokares un GEL laiduma garuma attiecība režīmā ar vada sasilšanu līdz +70°C dažādajiem vadu tipiem līnijas LNr. 266 analīzei	125
4.8. att.	Pieļaujamie vēja (L_v), svara (L_s) un gabarīta (L_g) laidumi abos režīmos dažādajiem vadu tipiem līnijas LNr. 266 analīzei	126
4.9. att.	GEL LNr. 266 izbūves kapitālieguldījumi	129
4.10. att.	Esošās GEL LNr. 355 elektriskā shēma	131
4.11. att.	LNr. 355 izbūves kapitālieguldījumi	134
4.12. att.	GEL maksimālās strāvas optimistiskie un pesimistiskie scenāriji 330 kV un 110 kV ķēdēm	135
4.13. att.	Izvēlēto balstu konstruktīvā skice GEL analīzei	137
4.14. att.	330/110 kV GEL shēma ar abu ķēžu fāžu izvietojumu	138
4.15. att.	EL intensitātes (E_{max}) sadalījums augstumā $Y = 1,8$ m virs zemes 330/110 kV GEL šķērsgrīzumā minimālajiem 330/110 kV vadu gabarītiem līdz zemei: 8/10 m, 9/11 m, 9,5/11,5 m, 10/12 m, 11/13 m un 12/14 m	139
4.16. att.	EL intensitātes (E_{max}) sadalījums augstumā $Y = 1,8$ m virs zemes 330/110 kV GEL šķērsgrīzumā ar līnijas spriegumiem 363/121 kV minimālajiem 330/110 kV vadu gabarītiem līdz zemei 9,5/11,5 m, 10/12 m, 12/14 m un 12,5/14,5 m	139
4.17. att.	ML intensitātes (H_{max}) sadalījums augstumā $Y = 1,8$ m virs zemes 330/110 kV GEL šķērsgrīzumā pie fāžu strāvu moduļu vērtībām 2000 A 330 kV ķēdei un 1200 A 110 kV ķēdei šādiem minimālajiem 330/110 kV vadu gabarītiem līdz zemei: 8/10 m, 9/11 m, 10/12 m, 11/13 m un 12/14 m	140
4.18. att.	Pareto kopas diagramma, kas konstruēta pēc atlasītajām alternatīvām GEL projekta realizācijai	141
4.19. att.	GEL kapitālieguldījumi atbilstoši izvēlētajam variantam	143

Tabulu saraksts

2.1. tabula	NPV un ierobežojumu rādītāju P_{ri} sagaidāmās vērtības	73
3.1. tabula	GEL LNr. 600 mērījumu rezultāti	84
3.2. tabula	GEL LNr. 501, LNr. 321 un LNr. 303 mērījumu rezultāti	87
3.3. tabula	LNr. 600 aprēķinu rezultāti, balstoties uz eksperimentāliem datiem	90
3.4. tabula	LNr. 309 balsta aprēķina sākuma nosacījumi	103
4.1. tabula	GEL LNr. 266 un LNr. 309 pētīto vadu tehniskie dati	123
4.2. tabula	Dažādu vadu tipu termiskie parametri līnijai LNr. 266	127
4.3. tabula	Līnijai LNr. 355 apskatīto vadu tehniskie dati	132
4.4. tabula	Dažādo līnijai LNr. 355 izmantojamo vadu tipu salīdzinājums	133
4.5. tabula	Aplūkotās GEL projektēšanas alternatīvas	136
4.6. tabula	Fāžu un zibensaizsardzības troses (un OPGW) centru izvietojuma koordinātas un fāžu spriegumi (potenciāli), kas nepieciešami, lai nodrošinātu minimālos GEL gabarītus līdz zemei	138
4.7. tabula	NPV un ierobežojumu rādītāju Pr_i sagaidāmās vērtības	141
4.8. tabula	GEL kapitālieguldījumi individuālas uzvedības gadījumā	144
4.9. tabula	GEL kapitālieguldījumi kooperatīvās uzvedības gadījumā	144

IEVADS

TĒMAS AKTUALITĀTE

Elektroenerģijas nozares tagadējā attīstība, kuras galvenais mērķis ir nodrošināt nepārtrauktu un kvalitatīvu elektroenerģijas piegādi patērētājiem, balstās uz spēcīgu sazarotu energosistēmu rašanos, kas ietver sevī lielas elektrostacijas, iekšējās un starpsistēmu gaisvadu elektrolīnijas (GEL) un plašu sadales tīklu (ST). Kā redzams, viens no galvenajiem energosistēmu elementiem ir GEL, kuru loma nākotnes enerģētikas attīstībā pieaug lielos tempos, jo elektriskā tīkla (ET) paplašināšana būs nepieciešama gan valsts, gan starptautiskā mērogā.

Pieprasījums pēc elektroenerģijas nepārtraukti pieaug, piemēram, 2010. gadā Latvijas bruto elektroenerģijas patēriņš bija 7,5 TWh, bet tīklā nodotā elektroenerģija – 7,3 TWh. Savukārt pēc krīzes ir sācies elektroenerģijas patēriņa pieaugums, tāpēc sagaidāms, ka pieprasījums pēc elektroenerģijas Latvijā turpinās pieaugt un jau 2030. gadā elektroenerģijas neto patēriņa pieaugums pārsniegs 10 TWh [7]. Līdzīga tendence ir novērojama arī pasaulē [79].

Ievērojot to, ka 2030. gadā darbosies visi šobrīd plānotie starpvalstu savienojumi, piemēram, Estlink-2 (augstsprieguma līdzstrāvas kabelis starp Igauniju un Somiju 2013. gadā), NordBalt (zemūdens augstsprieguma līdzstrāvas kabelis starp Lietuvu un Zviedriju, pēc 2014. gada), LitPol (augstsprieguma GEL starp Lietuvu un Poliju pēc 2015. gada) un projekts „Kurzemes loks” (2018. gads), jau tagad nepieciešams izstrādāt, realizēt un ieviest esošajā elektropārvades tīklā (EPT) jaunas tehnoloģijas, jo jauno elektrisko savienojumu realizācijas, atjaunojamo energoresursu lielās ietekmes (vēja un saules elektrostacijas), enerģijas tirgus liberalizācijas un atomelektrostaciju (AES Kaļiņingradā, Visaginas un Baltkrievijas AES) būvniecības rezultātā būtiski palielināsies Baltijas pārvades tīklu tranzīta jaudas plūsmas noslodze [7]. Turklāt nepieciešams atzīmēt, ka liels procents no visām GEL, kuras šobrīd atrodas ekspluatācijā, celtas pirms 40...60 gadiem, norādot uz EPT fizisku un morālu novecošanu, kas savukārt prasa papildu atjaunošanas pasākumu ieviešanu. Tā rezultātā rodas daudz mērķtiecīgu uzdevumu, kas ir tieši saistīti ar EPT jaudas palielināšanu, nodrošinot drošu un kvalitatīvu elektroenerģijas piegādi patērētājiem.

Ņemot vērā iepriekšminētos apsvērumus, par aktuālu kļūst izskatīto problēmu risināšana, veicinot iespējas „mākslīgi” palielināt ET caurlaides spēju, piedāvājot un realizējot vairākus augstsprieguma elektrolīniju optimizācijas paņēmienus, kas formulēti un izstrādāti

šajā promocijas darbā. Izmantojot izstrādātos tehniski ekonomiskos risinājumus, būs iespējams palielināt esošajās un projektējamās GEL pārvadāmo jaudu (slēptās jaudas rezerves noteikšana), precīzi un operatīvi pieņemot pareizo lēmumu dažādos EPT pastāvošo problēmu gadījumos, rezultātā minimizējot kapitālieguldījumus.

Lietderīgi piebilst, ka, pielāgojoties tehnoloģiskajam progresam, ir efektīvi izmantot mūsdienīgus programnodrošinājuma kompleksus, kas ļauj ietaupīt laiku, sistematizē aprēķinus, samazina aprēķinu precizitātes kļūdas, atvieglo skaitļošanu un iegūto rezultātu analīzi.

DARBA MĒRĶIS UN ATRISINĀTIE UZDEVUMI

Darba mērķis ir energosistēmu ekonomiskās efektivitātes un drošuma līmeņa paaugstināšana, kā arī kaitīgās ietekmes uz vidi samazināšana.

Lai sasniegtu definēto mērķi, darbā **atrisināti šādi uzdevumi**:

1. Veikta augstsprieguma elektrolīniju galveno elektriskās jaudas pārvades spēju ietekmējošo parametru analīze, kā arī apskatītas GEL caurlaides spējas palielināšanas metodes un rīki.
2. Sintezēts GEL pieļaujamās slodzes strāvas monitoringa algoritms (no termiskā viedokļa), kas ļauj palielināt esošo līniju caurlaides spēju vairumā režīmu praktiski bez papildu kapitālieguldījumiem.
3. Esošo GEL vadu temperatūras un slodzes strāvas novērtēšanas metožu pārbaudei tika veikti eksperimentāli mērījumi vairākos augstsprieguma līniju darba režīmos, kas ļāva izvēlēties vietējiem klimatiskajiem apstākļiem vispiemērotāko metodi.
4. Veikta augsttemperatūras vadu ar kompozītmateriālu serdeni izmantošanas iespēju un efektivitātes analīze vietējiem klimatiskajiem un ekonomiskajiem apstākļiem.
5. Pamatota GEL daudzkritēriju optimizācijas uzdevuma nostādne ar Pareto pieejas un scenāriju pieejas izmantošanu galīgā lēmuma pieņemšanai.
6. Veikti projekta „Kurzemes loks” 110 un 330 kV līniju vada temperatūras un slodzes strāvas aprēķini pie uzdotās GEL noslodzes, kā arī elektriskā un magnētiskā lauka parametru aprēķini un izstrādātas rekomendācijas vadu izvēlei.
7. Sintezēta GEL kapitālieguldījumu sadales metode, kuru izmanto dažādiem akcionāriem piederoši uzņēmumi.

PĒTĪJUMA METODES UN LĪDZEKĻI

1. Augstsprieguma līniju vadu un klimatisko apstākļu parametru mērīšanai izmantotas mūsdienīgas mērījumu iekārtas: termovīzijas iekārta – *FLIR ThermoCAM P65* [64]; vadu augstuma mērītājs, termohigrometrs – *Testo 635-1*, kabatas laika apstākļu mērītājs – *Kestrel 4000* [85].
2. Līniju parametru aprēķiniem izmantoti specializētie programmatūras kompleksi: *PLS-CADD* [104] un *SAPR LEP* [110].
3. Līniju parametru tehniski ekonomiskā optimizācijas uzdevuma formulēšanai un atrisināšanai izmantoti statistisko lēmumu teorijas [9, 20, 83, 94, 132, 142], spēļu teorijas [49, 90, 100], kooperatīvo spēļu teorijas paņēmieni.
4. Ietekmes uz vidi novērtēšanai izmantoti elektromagnētiskā lauka teorijas jēdzieni un aprēķinu algoritmi.
5. Līniju parametru izvēlei izmantoti Latvijas [1, 5, 6, 11-15], Eiropas Savienības [50] un Krievijas [146] standarti.

DARBA ZINĀTNISKĀ NOVITĀTE

1. Izmantojot viedo tīklu koncepciju un rīkus (viedie mērītāji, ātrdarbīgi un droši sakaru kanāli), piedāvāts sintezēts augstsprieguma līniju pieļaujamās slodzes strāvas monitoringa algoritms (no termiskā viedokļa), kas ļauj paaugstināt esošo GEL caurlaides spēju vairumā režīmu.
2. Veiktie eksperimentālie mērījumi reālām GEL dažādos režīmos ļauj ievērojami precizēt esošās augstsprieguma līniju vadu temperatūru un slodzes strāvu novērtēšanas metodikas un algoritmus.
3. Piedāvātā kooperatīvo spēļu teorijas elementu izmantošana ļauj dibināt dažādu uzņēmumu koalīcijas GEL izbūves gaitā. Pierādīta šādu koalīciju dibināšanas nosacījumu esamība un racionalitāte.
4. Pierādīta daudzkritēriju uzdevuma atrisināšanas pieejas izmantošanas racionalitāte. Pareto lēmumu kopas izdalīšana ļauj novērtēt ietekmes uz vidi indikatoru uzlabošanas izmaksas un sekmē pamatotus lēmumus.

PROMOCIJAS DARBA PRAKTISKAIS PIELIETOJUMS

1. Augsttemperatūras vadu pielietošanas iespēju analīze, elektriskā un magnētiskā lauka aprēķinu rezultāti, vada temperatūras un slodzes strāvas aprēķinu rezultāti, vada optimizācijas uzdevuma atrisināšanas rezultāti tika izmantoti, pamatojot un projektējot nozīmīgu Latvijas un Baltijas valstu pārvades sistēmas infrastruktūras energoobjektu – „Kurzemes loks” (1. posms), kas iekļauj 330/110 kV GEL būvi.
2. Darbā pamatoto ieguldījumu sadales metodi un algoritmu var izmantot enerģētisko un sakaru un komunikāciju uzņēmumu koalīciju dibināšanai un kopējo kapitālieguldījumu samazināšanai.

AUTORES PERSONISKAIS IEGULDĪJUMS

Augstsprieguma līniju optimizācijas uzdevuma izvēle par darba pamatvirzienu veikta ar profesora Edvīna Vanzoviča palīdzību. Daudzkriteriālā uzdevuma formulējums un kooperatīvo spēļu teorijas pielietojums piedāvāts ciešā sadarbībā ar profesoru Antanu Sauhatu. Eksperimenti veikti kopā ar AS „Latvijas elektriskie tīkli” ekspertiem.

Visi aprēķini, ieejas datu vākšana un apkopojums, rezultātu verifikācija, secinājumi pieder personiski autorei.

PROMOCIJAS DARBA APROBĀCIJA

1. Augsttemperatūras vadu pielietošanas iespējas, elektriskā un magnētiskā lauka aprēķinu rezultāti, vadu temperatūru un slodzes strāvu aprēķinu rezultāti, balstu izvietojuma rekomendācijas vairākkārt apspriesti ar AS „Latvijas elektriskie tīkli” un AS „Siltumelektroprojekts” („Kurzemes loka” ģenerālprojektētājs) ekspertiem.
2. Iegūtie rezultāti atspoguļoti Valsts pētījumu programmas projektā „Inovatīvas enerģijas resursu ieguves un izmantošanas tehnoloģijas un zema oglekļa emisiju nodrošināšana ar atjaunojamiem energoresursiem, atbalsta pasākumi vides un klimata degradācijas ierobežošanai – LATENERGI”.
3. Promocijas darba rezultāti ziņoti un pozitīvi novērtēti 12 starptautiskās konferencēs:
 - 3.1. The 51st Annual International Scientific Conference of Riga Technical University, Latvia, Riga, October 14, 2010.
 - 3.2. The 6th International Conference on Electrical and Control Technologies ECT 2011, Lithuania, Kaunas, May 5 – 6, 2011.

- 3.3. The 10th International Conference on Environment and Electrical Engineering IEEEIC 2011, Italy, Rome, May 8 – 11, 2011.
 - 3.4. IEEE PES Trondheim PowerTech 2011, Norway, Trondheim, June 19 – 23, 2011.
 - 3.5. The 52nd Annual International Scientific Conference of Riga Technical University Power and Electrical Engineering, Latvia, Riga, October 14, 2011.
 - 3.6. The International Conference on Electrical Power and Energy Systems ICEPES 2012 (WASET), Switzerland, Zurich, January 15 – 17, 2012.
 - 3.7. The 7th International Conference on Electrical and Control Technologies ECT 2012, Lithuania, Kaunas, May 3 – 4, 2012.
 - 3.8. 9th International Conference on the European Energy Market EEM12, Italia, Florence, May 10 – 12, 2012.
 - 3.9. Riga Technical University 53rd International Scientific Conference dedicated to the 150th anniversary and the 1st Congress of World Engineers and Riga Polytechnical Institute, Latvia, Riga, October 11, 2012.
 - 3.10. The 12th International Conference on Environment and Electrical Engineering IEEEIC 2013, Poland, Wroclaw, May 5 – 8, 2013.
 - 3.11. IEEE PES Grenoble PowerTech 2013, France, Grenoble, June 16 – 20, 2013.
 - 3.12. Riga Technical University 54th International Scientific Conference Power and Electrical Engineering, Latvia, Riga, October 14, 2013.
4. Promocijas darba rezultāti atspoguļoti:
- 4.1. Starptautiski referējamās zinātniskās žurnālos:
 - 4.1.1. Berjozkina S., Bargels V., Sauhats A., Vanzovichs E. Elektropārvades līniju vadu ar kompozītmateriālu serdeni izmantošanas iespēju salīdzinošs vērtējums// Scientific Journal of Riga Technical University. - 2011. - Vol.28. - pp. 13.-18.
 - 4.1.2. Berjozkina S., Sauhats A., Bargels V., Vanzovichs E. Detecting the Capacity Reserve in an Overhead Line// International Journal of Electrical, Electronic Science and Engineering. - 2012. - Vol.61. - pp. 327-332.
 - 4.1.3. Berjozkina S., Sauhats A., Vanzovichs E. Simulations of the Allowable Load Current of the Overhead Lines in the Latvian Power Network// Journal of Energy and Power Engineering (JEPE). - 2012. - Vol.6. (No.9). - pp. 1521-1526.

4.1.4. Berjozkina S., Sauhats A., Banga A., Jakusevics I. Evaluation of Thermal Rating Methods Based on the Transmission Line Model// Latvian Journal of Physics and Technical Sciences. - 2013. - Vol.50 (No.4). - pp. 22-33.

4.1.5. Berjozkina S., Sauhats A., Vanzovichs E. Evaluation of the Profitability of High Temperature Low Sag Conductors // Scientific Journal of Riga Technical University. - 2013. - Vol.31. - pp. 18.-24.

4.2. Starptautiski referējamos zinātnisko rakstu krājumos:

4.2.1. Vanzovichs E., Aristovs T., Berjozkina S. Allowable Load Current Calculation Method with Heating Limitation for Overhead Powerlines// Abstract Book and Electronic Proceedings of the 51st Annual International Scientific Conference of Riga Technical University. - Riga, Latvia: RTU, 2010. - pp. 47-52.

4.2.2. Beryozkina S., Sauhats A., Vanzovichs E. Mechanical and Thermal Limitations of the Load Current of the Transmission Line // Proceedings of the 6th International Conference on Electrical and Control Technologies ECT 2011. - Kaunas, Lithuania: Kaunas University of Technology, 2011. - pp. 336-340.

4.2.3. Beryozkina S., Sauhats A., Vanzovichs E. Modeling of the load current of the transmission line// Proceedings of the 10th International Conference on Environment and Electrical Engineering IEEEIC 2011. - Rome, Italy: IEEE, 2011. - pp. 911-914.

4.2.4. Beryozkina S., Sauhats A., Vanzovichs E. Climate Conditions Impact on the Permissible Load Current of Transmission Line// Proceedings of the IEEE PES Trondheim PowerTech 2011 Conference. - Trondheim, Norway: IEEE PES, 2011. - 6. p.

4.2.5. Berjozkina S., Bargels V., Sauhats A., Vanzovichs E. A Comparative Assessment of Conductors with Composite Core// Abstract Book and Electronic Proceedings of the 52nd Annual International Scientific Conference of Riga Technical University. - Riga, Latvia: RTU, 2011. - 6. p.

4.2.6. Berjozkina S., Sauhats A., Bargels V., Vanzovichs E. High Temperature Low Sag Conductors as Method for the Improvement of Electrical Transmission Lines// Proceedings of the 7th International Conference on Electrical and Control Technologies ECT 2012. - Kaunas, Lithuania: Kaunas University of Technology, 2012. - pp. 200-205.

- 4.2.7. Berjozkina S., Sauhats A., Bargels V., Vanzovichs E. The Technical and Economic Efficiency of Using Conductors with Composite Core in the Transmission Grid// Proceedings of the 9th International Conference on the European Energy Market EEM12. - Florence, Italy: IEEE, 2012. - 7. p.
- 4.2.8. Moshkin I., Berjozkina S., Sauhats A. Solving of Transmission Network Development Tasks in Market and Uncertainty Conditions// Proceedings of the 9th International Conference on the European Energy Market EEM12. - Florence, Italy: IEEE, 2012. - 7. p.
- 4.2.9. Berjozkina S., Sauhats A., Banga A., Jakusevics I. Testing Thermal Rating Methods for the Overhead High Voltage Line// Proceedings of the 12th International Conference on Environment and Electrical Engineering IEEEIC 2013. - Wroclaw, Poland: IEEE, 2013. - pp. 215-220.
- 4.2.10. Beryozkina S., Sauhats A., Neimane V. Designing a Transmission Line Using Pareto Approach// Proceedings of the IEEE PES Grenoble PowerTech 2013 Conference. - Grenoble, France: IEEE PES, 2013. - 6. p.
- 4.2.11. Berjozkina S., Sauhats A. Review of Advanced Transmission Technologies towards the Smart Grid// Digest Book and Electronic Proceedings of the 54th International Scientific Conference of Riga Technical University. - Riga, Latvia: RTU, 2013. - 6. p.
- 4.2.12. Petrichenko L., Sauhats A., Guseva S., Berjozkina S., Neimane V. The stochastic approach for determination of transmission line wire cross section// Proceedings of the 2014 International Conference on Circuits, Systems, and Control. - Interlaken, Switzerland: EUROPMENT, 2014. - 7. p.

PROMOCIJAS DARBA STRUKTŪRA UN APJOMS

Promocijas darbs uzrakstīts latviešu valodā, tas satur ievadu, 4 nodaļas, secinājumus un rekomendācijas, literatūras sarakstu un 12 pielikumus. Darba kopapjoms ir 170 datorsalikuma lapaspuses, kurās ietverti 65 attēli un 14 tabulas un pielikuma 12 lapaspuses. Literatūras sarakstā norādīti 154 izmantotās literatūras avoti.

Ievadā pierādīta promocijas darba aktualitāte un pētījumu virziena izvēles pamatotība. Formulēts darba mērķis un pamatuzdevumi. Aprakstītas pētījumu un izstrādņu metodes un līdzekļi. Definēta zinātniskā novitāte un ieguldījums. Atspoguļota apkopoto rezultātu aprobācija un praktiskais pielietojums.

Pirmajā nodaļā pamatota augstsprieguma elektrolīniju lomas nozīme energosistēmā gan pasaules, gan valsts mērogā; aplūkoti GEL galvenie konstruktīvie elementi un parametri, kas ietekmē to mehāniskos, termiskos un vides ierobežojumus, tā rezultātā ļaujot rast optimālu elektrolīnijas projektēšanas variantu ciešā savstarpējā mijiedarbībā. Aprakstīti jauno tehnoloģiju aktuālie virzieni, kas pašlaik tiek attīstīti, izstrādāti, ieviesti, modernizēti, pielāgojoties viedo tīklu koncepcijai. Izskatītas GEL projektēšanā izmantojamās metodes, pieejas, režīmu vadības iespējas un algoritmi, kā arī analizēta moderno datorprogrammu nodrošinājuma kompleksu izmantošanas iespēja. Turklāt atsevišķi tiek skarts aktuālais jautājums par GEL ietekmi uz vidi.

Otrajā nodaļā apskatīts GEL daudzkritēriju optimizācijas uzdevuma formulējums, pamatpieejas uzdevuma nostādne. Formulētas mērķa funkcijas un ierobežojumi, kā arī definēta scenāriju un Pareto pieeja. Sniegts izvirzītā augstsprieguma līniju optimizācijas uzdevuma atrisināšanas algoritms un metode. Turklāt apskatīta sintezētās GEL kapitālieguldījumu sadales metodes teorētiskā bāze, kas balstās uz koalīciju dibināšanas un Šeplija sadalījuma pieejām.

Trešā nodaļa veltīta GEL galveno parametru eksperimentālajiem mērījumu rezultātiem dažādām esošām Latvijas augstsprieguma līnijām vairākos darba režīmos pie vietējiem laika apstākļiem. Balstoties uz GEL pieļaujamās slodzes strāvas monitoringa sistēmas (no termiskā viedokļa) verifikācijas modeļu iegūto rezultātu analīzi, tika piedāvāts sintezēts GEL pieļaujamās slodzes strāvas monitoringa algoritms, kura izmantošana ļauj uzlabot pieļaujamās vada temperatūras un slodzes strāvas aplēses precizitāti esošām vai projektējamām GEL, kā arī ļauj pielāgoties GEL dinamiski operatīvai kontrolei un vadībai reālā laika režīmā.

Ceturtajā nodaļā aplūkoti augstsprieguma elektrolīniju optimizācijas piemēri un to pētījumu rezultāti – GEL projektēšanas metodes, kas ir daļēji balstīta uz stohastiskās pieejas

un spēļu teorijas kritērijiem, izmantošanu galīgā lēmuma pieņemšanai par EPL realizāciju; kā arī GEL optimizācija ar energouzņēmumu koalīcijas dibināšanas piemēru. Papildus tika izskatīts aktuālais jautājums, kas saistīts ar jaunu tehnoloģiju integrēšanu – augsttemperatūras vadi ar kompozītmateriāla serdeni, rezultātā pamatojot šāda optimizācijas risinājuma racionalitāti. Iepriekšminētie pētījumu rezultāti balstās gan uz reālu nozīmīgu Latvijas un Baltijas valstu pārvades sistēmas infrastruktūras energoobjektu – „Kurzemes loks” (1. posms), kas iekļauj 330/110 kV GEL būvi, gan uz esošajiem GEL piemēriem, izmantojot mūsdienīgus programmatūras kompleksus – *PLS-CADD* un *SAPR LEP*.

Piektā nodaļa sniedz iegūto rezultātu secinājumus un ieskatu nākotnes promocijas darbā, piedāvājot šī darba izvirzīto ideju un pētījumu attīstības etapus.

1. AUGSTSPRIEGUMA ELEKTROLĪNIJU OPTIMIZĀCIJAS UZDEVUMA FORMULĒJUMS, IZMANTOJAMĀS METODES UN RĪKI

1.1. GEL loma energosistēmās

1.1.1. Pašreizējā situācija pasaulē

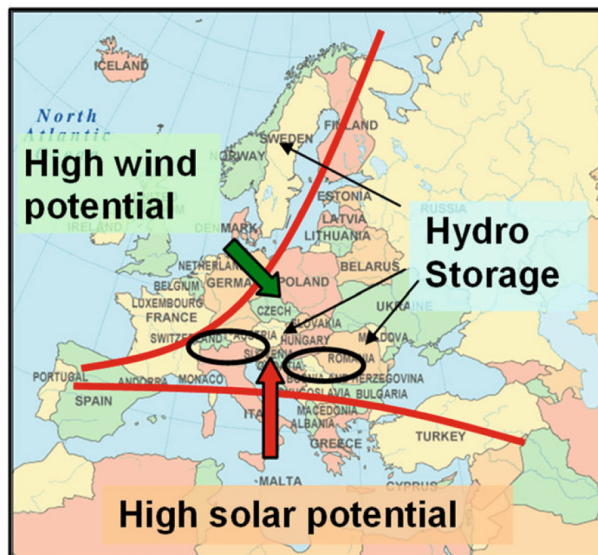
Mūsdienu elektroenerģētikas attīstība, kas vērsta uz nepārtrauktas energoapgādes nodrošināšanu visām tautsaimniecības nozarēm, balstās uz jaudīgu, sazarotu energosistēmu izveidi, kuras ietver lielas elektrostacijas, sistēmu iekšējās saites un starpsistēmu saites – GEL, kā arī plašu ST. Izmaksas saistībā ar energosistēmu izveidi un funkcionēšanu galarezultātā ietekmē galaprodukta cenu un daudzumu, tādēļ jautājumi, kas saistīti ar kapitālieguldījumu pazemināšanos, būvējot energoobjektus, un ar energoresursu efektivitātes paaugstināšanos, ir visai aktuāli. Turklāt elektroenerģētikas plašas attīstības apstākļos nākas arī risināt uzdevumus saistībā ar energoobjektu ietekmes uz vidi ierobežošanu un kaitējuma mazināšanu tautsaimniecībai sakarā ar lielu zemes platību atsavināšanu energoobjektu būves vajadzībām, it īpaši tas skar augstsprieguma līnijas.

Rezultātā var secināt, ka viens no galvenajiem energosistēmu elementiem ir GEL, kuru nozīme līdz ar tālāku enerģētikas attīstību arvien pieaug. To nosaka vairāki iemesli:

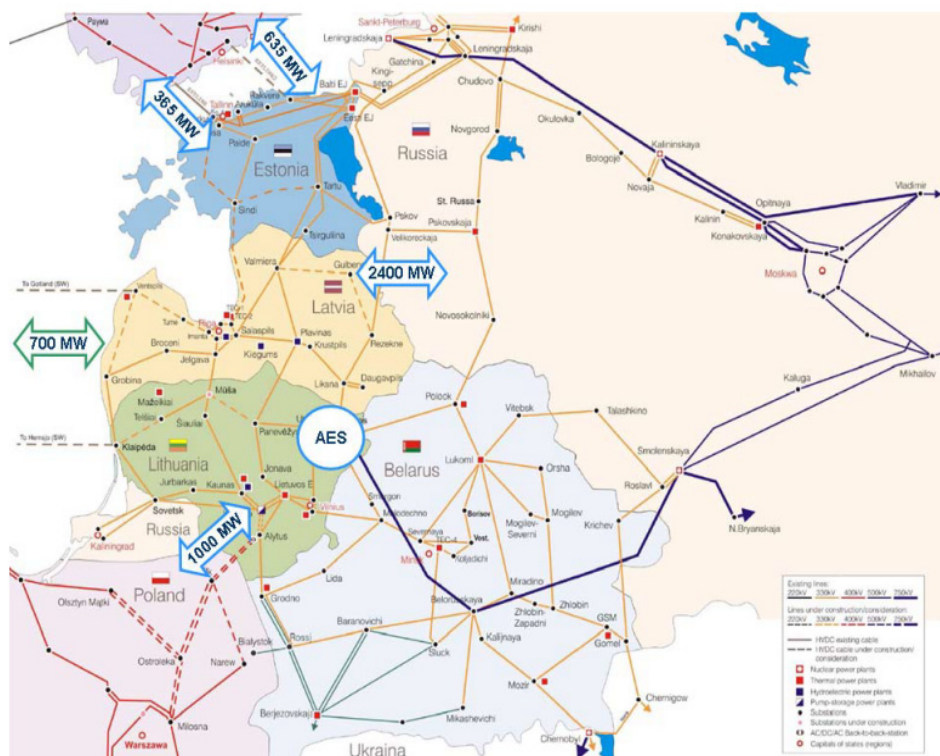
- 1) elektroenerģijas ražošana notiek pamatā dažādu tipu lielās elektrostacijās, tostarp termoelektrostacijās (TES), hidroelektrostacijās (HES), AES, kuras būvē nepieciešamo enerģijas avotu tuvumā vai arī vietās, kur tas ir tehniski un ekonomiski mērķtiecīgi labvēlīgu teritoriālu un klimatisku apstākļu dēļ;
- 2) lielā atjaunojamo enerģijas avotu, īpaši vēja un Saules elektrostaciju, ietekme, kuras, kā paredzams, dominēs Eiropas energoapgādē ilgtspējīgas nākotnes energosistēmas ietvaros, piemēram, augsti atjaunojamo enerģijas avotu potenciāli (īpaši Ziemeļjūras jūras vēja parki un Dienvideiropas Saules elektrostacijas) ar lielo slodzi izvietojumu Centrāleiropā, kur atjaunojamo enerģijas avotu potenciāls ir mazāks (sk. 1.1. att.) [93];
- 3) nepieciešamība paplašināt un izveidot jaunus elektriskos savienojumus starp valstīm sakarā ar nozīmīgu enerģētikas spēlētāju ietekmi, piemēram, Krievijas Federācija, kura, kā paredzams, paaugstinās savas ģenerējošās jaudas līdz ar AES uzcelšanu Kaļiņingradā, kā arī Visaginas AES (Lietuva) un AES Baltkrievijā ar jaudu 3000 MW un augstāku, kur jauno AES elektriskās jaudas izdošana un eksports uz Ziemeļvalstīm arī radīs nepieciešamību paplašināt Baltijas reģiona iekšējo EPT, piemēram, starp

Latviju un Lietuvu (Ignalina – Līksna, esošā 330 kV līnija) un starp Igauniju un Latviju (Sindi – Rīgas TEC-2, būvējama 330 kV līnija) (sk. 1.2. att.) [37].

4) pārrobežu enerģijas tirdzniecība [28, 54].



1.1. att. Atjaunojamo enerģijas avotu potenciāls Eiropā [93]



1.2. att. Baltijas energosistēmu jaunie elektriskie savienojumi

Tā rezultātā būs nepieciešams paplašināt ET gan valstu, gan starptautiskā mērogā. Tādējādi pieaugošā pārrobežu tirdzniecības attīstība, izmantojot starpniecības iespējas starp dažādajiem nacionālajiem tirgiem, uzsvē pastāvošos pārrobežu ceļus, kas sākotnēji vairāk

iecerēti savstarpēja atbalsta sniegšanai nekā ievērojamu komerciāla rakstura plūsmu uzņemšanai. Visieteicamākais šajos gadījumos būtu likvidēt ET visas „šaurās vietas”, kas ierobežo enerģijas pārvadi. Turpretī nozīmīgas Eiropas EPT infrastruktūras noveco, un tās nepieciešams nomainīt. Tomēr kļūst arvien grūtāk būvēt jaunas GEL sakarā ar dažādiem ierobežojošiem faktoriem, piemēram, sarežģītu likumdošanas ietvaru, iedzīvotāju protestiem, augstu iedzīvotāju blīvumu, intensīvu zemes izmantošanu, vizuālo efektu, vides jautājumiem, ar tīklu saistītiem jautājumiem, elektromagnētiskajiem laukiem, sarežģītu reljefu un LA, kā arī, protams, komerciāla rakstura problēmām, kas izraisa daudzu elektropārvades paplašināšanas projektu aizkavēšanos vai pat atcelšanu [47].

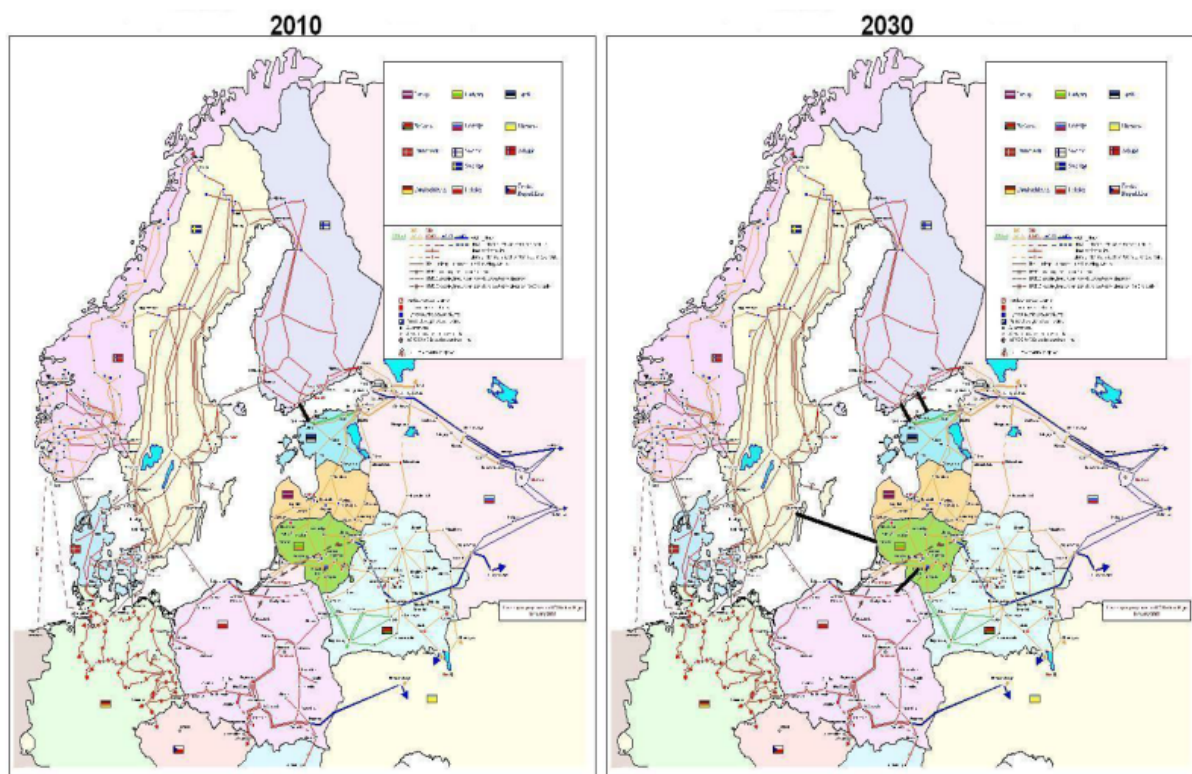
Neskatoties uz iepriekšminēto problēmu klāstu, pastāv gan esoši, gan plānoti GEL projekti, detalizētu galveno elektrolīniju projektu sarakstu var aplūkot [70]. Vērts piebilst, ka arī pašlaik energouzņēmumi pastāvīgi tiek aicināti iesniegt savus piedāvājumus jaunu EPL celtniecībai un esošo līniju rekonstrukcijai un modernizāciju (konkursi), piemēram, tiks realizēti nesen konkursos iegūtie projekti – uzņēmums *Eltel Networks* ieguvis tiesības izstrādāt 420 kV GEL projektu, *ABB* saņēmis divus pārvades sistēmu pasūtījumus Norvēģijā, bet Vācijas uzņēmums *Ampiron* izstrādās 1 miljardu eiro vērtu 50 Hz elektrolīnijas projektu [70]. EPT jauno savienojumu paplašinājuma tendenci pasaulē apstiprina arī fakts, ka augstsprieguma elektrolīniju garumu pieauguma dinamika katru gadu palielinās, piemēram, 2010. gadā Krievijā GEL kopējais garums bija 140 000 km; Ķīnā – 442 700 km.

1.1.2. Pašreizējā situācija Latvijā

Iepriekšminētie aktuālie aspekti, kas skar EPT pasaulē, ir attiecināmi arī uz Latvijas ET infrastruktūru. Zināms, ka Latvijas energosistēma, tāpat kā pārējo Baltijas valstu energosistēmas, strādā paralēlā režīmā ar Krievijas un Baltkrievijas energosistēmām vienotā gredzentīklā, tā saucamajā BRELL. Gredzentīkls BRELL pašlaik darbojas, balstoties uz BRELL vienošanos, ko iesaistītie uzņēmumi (*Belenergo* (Baltkrievija), *FGC UES* (Krievija), *SO UES* (Krievija), *Elering OÜ* (Igaunija), *Latvijas elektriskie tīkli* (Latvija), *LITGRID UAB* (Lietuva)) parakstījuši 2001. gada 1. februārī, un to sadarbības pārvaldes institūcija ir BRELL Komiteja, kura sastāv no pārvades sistēmas operatoru (PSO) pārstāvjiem. Kopējā elektroenerģijas pārvades jauda starp Krievijas apvienoto energosistēmu, Baltkrievijas energosistēmu un Baltijas valstu energosistēmām ir 4000 MW. Starptautiskos elektroenerģijas starpsavienojumus, kas iekļauti BRELL tīklā, var apskatīt 1. pielikumā [55, 77]. Savukārt

kopējo pārvades jaudu un maksimāli pieļaujamās strāvas lielumus esošajam Latvijas EPT var aplūkot vispārējā elektriskā shēmā (sk. 2. pielikumu) [17].

Latvijas elektroapgāde ir atkarīga no bāzes režīmā strādājošām Latvijas un kaimiņu valstu elektrostacijām, to energosistēmas operatīvais drošums ir lielā mērā atkarīgs no gredzentīkla BRELL darbības, savukārt analizējot elektroenerģijas balansēšanas drošumu, jāievēro gan Latvijas, gan kaimiņvalstu ģenerējošo avotu attīstība un iespēja pārvadīt šo enerģiju pa GEL (sk. 1.3. att.).



1.3. att. EPT attīstība

Energosistēmas efektīvai funkcionēšanai nepieciešama infrastruktūra, kas nodrošinātu pieprasītās elektroenerģijas un siltuma ražošanas jaudas vienlaicīgi ar līdzvērtīgu enerģijas pārvades tīklojumu – adekvātiem elektriskajiem tīkliem un sistēmas vadību. Izmaiņas Latvijas tautsaimniecībā un valsts atsevišķu reģionu attīstībā rada nepieciešamību veikt gan jaunu GEL un a/st. celtniecību, gan esošo EPL un a/st. rekonstrukciju. Atšķirībā no Lietuvas un Igaunijas Latvijas elektrostaciju jauda jau šobrīd nav pietiekama – vērojams ap 500 MW liels deficīts, ņemot vērā energosistēmai nepieciešamo jaudas rezervi, lai jebkurā brīdī nosegtu jaudas pieprasījumu [24]. Maksimālā elektriskā slodze no 1320 MW 2010. gadā pieaugs līdz apmēram 1,6 GW 2020. gadā, bet 2030. gadā līdz 1,9 GW. Elektriskās slodzes prognoze ir normalizēta, ņemot vērā LA, kas atbilst vidējai ilggadējai ārgaisa temperatūrai. Elektriskā

slodze pieaugs visā reģionā, 2020. gadā pīķa slodze Baltijā sasniegs apmēram 5,8 GW, bet 2030. gadā – ap 7 GW [7].

Latvijas augstsprieguma GEL kopgarumi uz 2013. gada 1. janvāri ir šādi: 330 kV – 1250,13 km; 110 kV – 4010,11 km.

Neskatoties uz pozitīvo jaudas bilanci reģionā, Latvijas elektrostaciju elektroenerģijas ģenerācijas iespējas nav pietiekamas (it īpaši ziemas režīmos), kad pieejamā elektrostaciju jauda ir nepietiekama slodzes segšanai, jo elektrostacijās ir nepieciešams uzturēt jaudas rezerves. Kā zināms, Latvijā galvenās uzstādītās ģenerējošās jaudas tiek nodrošinātas, galvenokārt, ar HES (Daugavas HES kaskādē 3445 GWh) un TEC (Rīgas TEC-1 un Rīgas TEC-2 – 2402 GWh) saražoto elektroenerģiju, bet iztrūkstošā elektroenerģijas daļa tiek iepirkta no kaimiņvalstīm. Vērts piebilst, ka pēdējos gados ir pieaudzis mazu un decentralizētu elektrostaciju skaits un to kopējā jauda, kur elektroenerģiju ražo no atjaunojamajiem energoresursiem, kā arī darbojas koģenerācijas stacijas. Tā rezultātā ģenerējošā sistēma ir jutīga, un tās prognozēšana ir komplicēta, jo jāņem vērā gan enerģētikas elektroenerģijas ražošanas, gan siltuma ražošanas aspekti, tādējādi nosakot un izvērtējot risku attiecībā uz atkarību no viena energoresursu piegādātāja [3, 7, 8, 17].

Turklāt līdztekus ir jānovērtē arī šādi galvenie papildu enerģētikas riski [8]:

- ✓ atkarība no viena importējama energoresursa,
- ✓ augošs elektroenerģijas un siltuma patēriņš,
- ✓ enerģijas ražošanas bāzes jaudu trūkums vai nepietiekamība,
- ✓ ierobežota konkurence enerģijas tirgū.

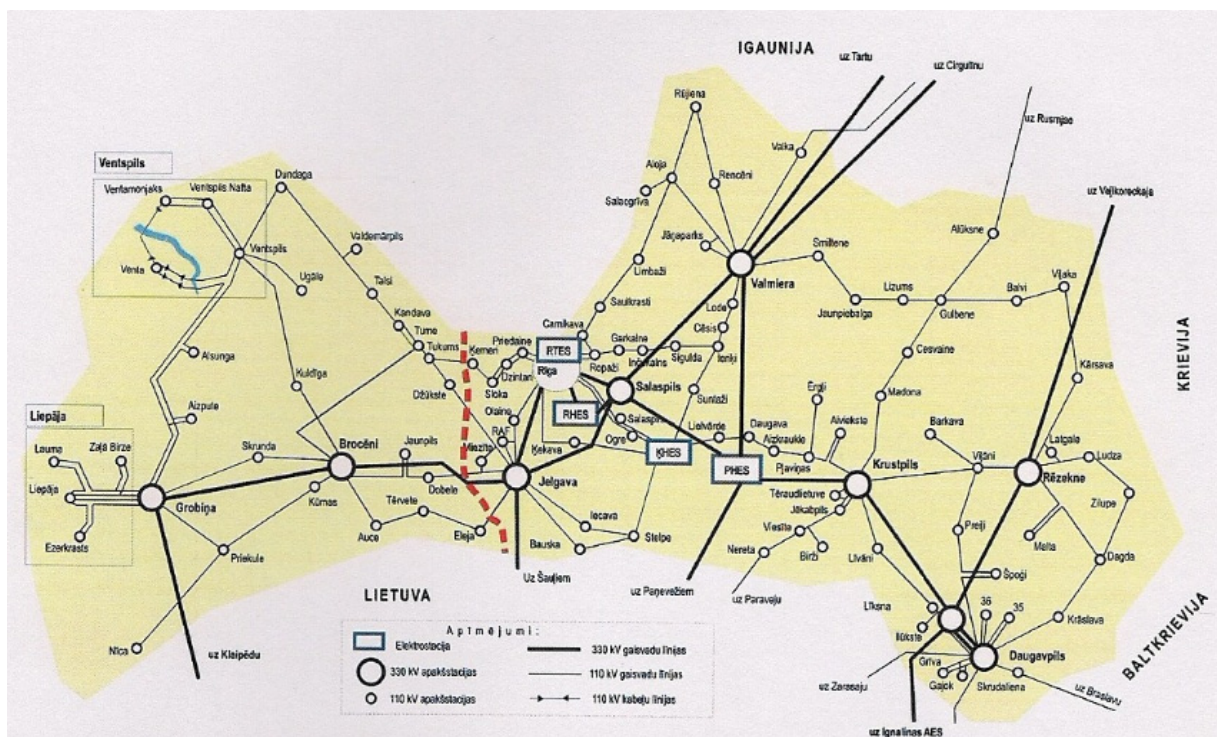
Šajā gadījumā ir vērts pieminēt izteikto risku un problēmu – Latvijas elektroenerģijas ražošanas iespējas nav pietiekamas, kā rezultātā palielinās elektrības imports no citiem ražotājiem, kas aptuveni sastāda 30%.

Latvijas rietumu reģiona EPT attīstības izvērtējuma nepieciešamību nosaka vairāki aspekti, tomēr viens no svarīgākajiem elektroenerģijas piegādes ziņā ir drošums. Kopējā pārvades sistēmā ievēro galveno energoapgādes drošības kritēriju „n-1”, izņemot gadījumus, kad rodas ārkārtas situācijas klimatisko apstākļu dēļ.

Kurzemes reģions, it īpaši Ventspils pilsētas elektroapgāde, ir viena no pārvades elektrotīkla „šaurajām vietām”. Tuvākajos gados šajā reģionā tiek prognozētas ievērojamas pārmaiņas gan pieslēgto ģenerējošo jaudu struktūrā, gan jaunu starpsavienojumu izveidošanas ziņā, piemēram, sagaidāma Kurzemes KES un vēja parku būvniecība Rietumu piekrastē, kā

arī plānota jaunu starpsistēmu savienojumu būvniecība no Baltijas uz Zviedriju un Somiju. Līdz ar to esošajai EPT caurlaides spējai jābūt pietiekamai, lai nodrošinātu šādus energosistēmas režīmus: normālo darba režīmu un plānotā remonta režīmu pie ziemas maksimālās slodzes un vasaras maksimālās slodzes režīmiem. Tā rezultātā, lai nodrošinātu minētos darba režīmus, nepieciešams noteikt atbilstošus tehniskos pasākumus: ET esošo iekārtu caurlaides spējas palielināšanu un jaunu pārvades sistēmas iekārtu būvniecību. Rietumu reģiona pārvades tīkla izvērtēšana tika sadalīta trīs attīstības etapos [3]:

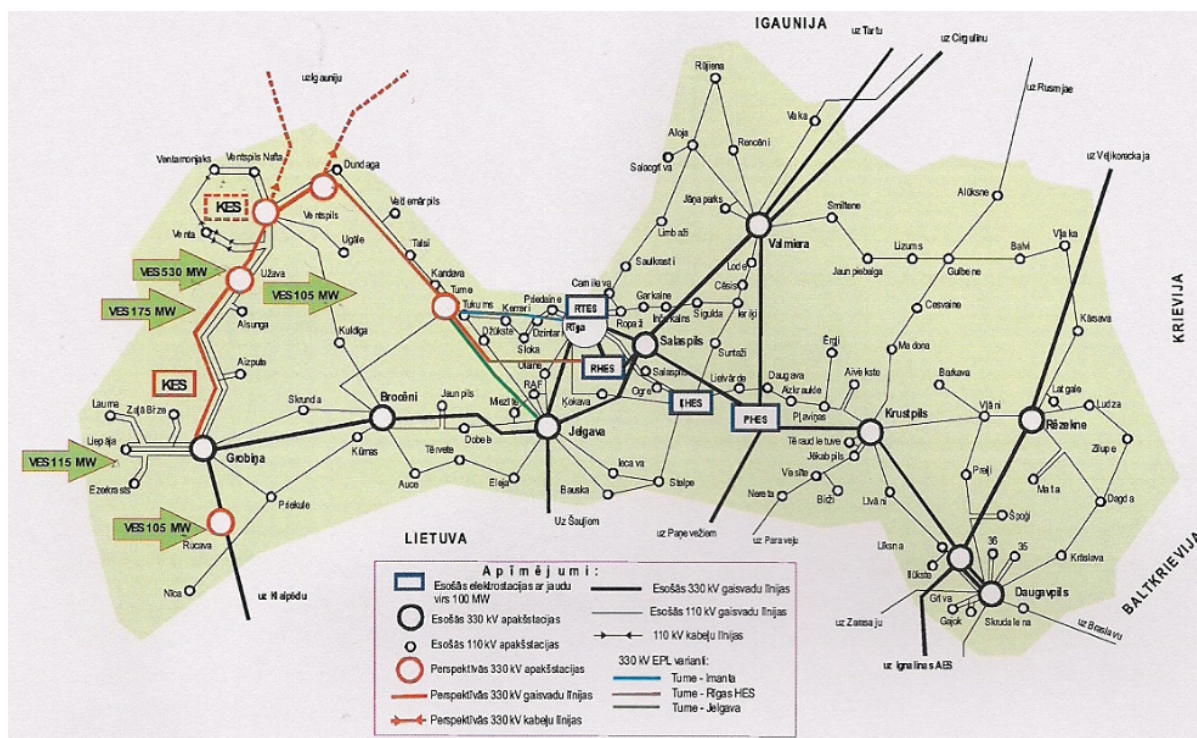
1. līdz 2013. gadam (sk. 1.4. att.);
2. līdz 2018. gadam (sk. 1.5. att.);
3. līdz 2025. gadam.



1.4. att. Latvijas 330 – 110 kV EPT shēmas variants līdz 2013. g. [3]

Pirmais attīstības etaps – EPT līdz 2013. g. – Kurzemes reģiona dienvidu daļas teritorijā ir attīstīts 330 – 110 kV ET, ziemeļu daļā – tikai 110 kV ET. Elektriskās jaudas plūsma uz slodzes rajoniem pamatā notiek no Latvijas centrālajā daļā esošajām elektrostacijām pa 330 – 110 kV GEL (sk. 1.4. att.). Analizējot EPT darba drošumu, jāsecina, pirmkārt, ka jau esošajā situācijā iespējamās pieļaujamā sprieguma līmeņa uzturēšanas problēmas „n-1” kritēriju darbības laikā, tādējādi nepieļaujot Ventspils pilsētā, kā arī Talsu un apkārtnes rajonā jaunu jaudīgu patērētāju pieslēgšanu. Otrkārt, GEL caurlaides spēja kļūst nepietiekama, jo līniju

vadu šķērsgriezums un garums ierobežo jaunu jaudīgu patērētāju pieslēgšanu, piemēram, katodu vai silīcija ražotnes Liepājā, līdz ar to nepieciešama jaunu EPT elementu vai jaunas elektrostacijas izbūve. Kurzemes zonā esošais 110 kV ET nevar nodrošināt atbilstoša līmeņa elektroapgādi, par ko liecina arī atslēgumi un elektroenerģijas pārvades traucējumi esošajās līnijās, radot nepieciešamību pēc jaunu jaudīgu augstsprieguma elektrolīniju, jaunu a/st. celtniecības un esošo a/st. paplašināšanas vai rekonstrukcijas šajā reģionā.



1.5. att. Latvijas 330 – 110 kV EPT shēmas variants līdz 2018. g. [3]

Kā otrais attīstības etaps – EPT līdz 2018. g. – Kurzemes elektroapgādes un EPT drošības palielināšanā jāveic 330 kV un 110 kV EPT savienojuma izveidošana Kurzemes reģionā, tā saucamā „Kurzemes loka” (KL) izveidošana, jo tika ievērots pieņēmums par Kurzemes KES izbūvi un elektroenerģijas patēriņa pieaugumu līdz 2018. g. KL izveidošanā ietilpst jaunu 330/110 kV GEL Liepāja (Grobiņa) – Ventspils – Dundaga – Tukums (Tume) – Rīga (330 kV a/st. Imanta) būve (sk. 1.5. att.). To izbūve uz Ventspils pilsētu ir pamatoti nepieciešama, jo Ventspilī izvietoti svarīgi Latvijas valsts mēroga uzņēmumi, līdz ar to arī lielākie elektroenerģijas patērētāji: AS „Ventamonjaks”, AS „Ventspils nafta”, AS „Liepājas metalurģis”, AS „Lauma”, AS „Brocēni”, SIA „Cemex”. Ventspils pilsētas un tās lielo patērētāju elektroapgādi var nodrošināt, izbūvējot 330/110 kV a/st. Ventspilī un elektroapgādi nodrošinot pa 330/110 kV EPL.

Pašreizējā situācijā Ventspils pilsēta un tās reģions saņem elektroenerģiju pa trijām 110 kV GEL: no Tukuma (142 km), no Brocēniem (150 km) un pa divķēžu 110 kV EPL no Grobiņas (118,3 km). Esošo GEL posmi ir fiziski un morāli novecojuši, un ar nepietiekošu caurlaides spēju. Iepriekšminētās GEL nevar garantēt drošu Ventspils pilsētas elektroapgādi. Kurzemes reģionā – Popē, Užavā un Dundagā – investori vēlas uzstādīt lielas jaudas (30 – 80 MW) vēja parkus. Lai šādas jaudas ieviestu un pārvaldītu EPT, jābūvē jauna 330/110 kV a/st. Užavā un Dundagā, kā arī 110 kV a/st. Popē.

Ņemot vērā ievērojamās 330/110 kV EPL izbūves izmaksas, GEL būvniecība paredzēta pa etapiem. Pirmajā etapā pasūtītājs ir paredzējis veikt ET savienojuma pastiprināšanu, veicot esošās divķēžu 110 kV līnijas rekonstrukciju un izbūvējot vienu 330 kV un vienu 110 kV EPL a/st. Grobiņa – a/st. Ventspils – a/st. Dundaga. Nākamajā etapā tiks risināti KL izbūves jautājumi posmā 330 kV a/st. Dundaga – a/st. Imanta. Tālākais Ventspils un Kurzemes reģiona elektroapgādes drošības paaugstināšanas variants varētu būt 330 kV sprieguma jūras kabeļa izbūve no Sindi (Igaunija) uz Ventspili (Latvija). Savienojumam izskata divus trases variantus [3]:

- 1) no Sindi a/st. Igaunijā caur Sāremā salu līdz Ventspilij/ Mazirbei – šis variants ir primārais, jo tas ir saistīts ar lieljaudas vēja parku izveidi Sāremā un Hījumā salās;
- 2) no Sindi a/st. Igaunijā pāri Rīgas jūras līcim līdz Ģipkai (Dundagas novads) – šis variants ir sekundārais, jo to varētu īstenot, ja nav vēja parku attīstības Igaunijā, tādā gadījumā līnijas trase būtu īsāka un optimālāka.

Jūras kabeļa izbūve ievērojami paaugstinātu ne tikai Kurzemes reģiona elektroapgādes drošību, bet visas Latvijas energosistēmas pārvades sistēmas drošību un veidotu drošāku savienojumu ar Igaunijas energosistēmu.

Trešais attīstības etaps – EPT līdz 2025. g. – saskaņā ar otro attīstības etapu – EPT līdz 2018. g. – ir pieņemts, ka uz 2025. g. KL ir izbūvēts, un papildus ir realizēts līdzstrāvas savienojums Latvija – Igaunija ar pieslēgšanas vietu pie a/st. Ventspils vai 330 kV sadales Dundagā, kā arī Kurzemes reģionā uzstādītā VES jauda 2025. g. varētu sasniegt ap 1430 MW, bet kopā ar KES – 1830 līdz 2230 MW.

Tā rezultātā Baltijas valstis arī turpmāk būs savienotas vienotā EPT un jau 2025. gadā ir iespējama Baltijas valstu energosistēmas sinhrona darbība ar Centrāleiropas energosistēmu un asinhrona darbība ar Krievijas un Baltkrievijas energosistēmām, līdz ar to jāveic sekojoši nepieciešamie pasākumi:

1. Latvijas EPT ir jāveic vairāku pārvades līniju izbūve un rekonstrukcija saskaņā ar elektroenerģijas pārvades sistēmas attīstības plānu un „Pārvades tīkla objektu atjaunošanas un rekonstrukcijas nepieciešamības izvērtēšanas kritērijiem”, pieprasot izpildīt attiecīgās tehniskās prasības, kas apkopotas [11];
2. starpvalstu savienojumu attīstība, kas saskaņota ar Latvijas pārvades sistēmas paplašināšanu, lai nodrošinātu pietiekamu elektroenerģijas pārrobežu apmaiņu un elektroenerģijas tirgus darbību;
3. elektroenerģijas sadales sistēmas modernizācija un paplašināšana, lai nodrošinātu elektroapgādes drošumu izkliedētās ģenerācijas apstākļos, kas izmanto vietējos energoresursus;
4. pārvades un sadales sistēmu modernizācija, kas nodrošinās elektroapgādes pārtraukumu samazināšanos 2030. gadā par 50 %.

Tādējādi, lai veiksmīgi atrisinātu jautājumus, kas saistīti ar enerģijas bilances nodrošināšanu un energosistēmu režīmu regulēšanu, nepieciešams izveidot GEL ar lielu caurlaides spēju, kuras veic transporta, starpsistēmu un sistēmas iekšējo saišu funkciju.

1.2. Augstsprieguma elektrolīniju konstrukcijas, parametri, ierobežojumi un cenas

1.2.1. GEL konstruktīvie elementi un parametri

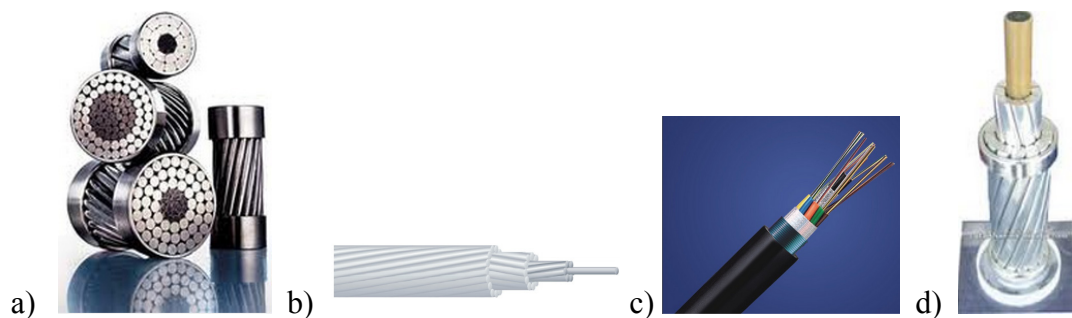
GEL galvenie konstruktīvie elementi ir vads, kas kalpo elektroenerģijas pārvadei; balsts, kura uzdevums ir noturēt līniju vadus un aizsargtrošes ar spriegumu normatīvos noteiktā augstumā virs inženiertehniskām būvēm; izolators, kas izolē vadus no balstiem; balsta traversa; aizsargtroše, kas aizsargā EPL pret zibens iedarbību; līniju armatūra, ar kuras palīdzību izolatorus nostiprina pie balstiem un vadus pie izolatoriem; zemēšanas ietaises; balsta pamati [4]. GEL konstruktīvajiem elementiem jābūt ar pietiekami lielu mehānisko stiprību, tāpēc to projektēšanas gaitā līdztekus elektriskajiem aprēķiniem veic arī mehāniskos aprēķinus, lai noteiktu ne tikai vadu materiālu un šķērsriezuma laukumu, bet arī izolatoru un balstu tipu, attālumu starp vadiem un balstiem utt.

1.2.1.1. GEL pielietojamie vadi un aizsargtrošes

GEL vadiem izvirza prasības attiecībā uz pietiekamu mehānisko stiprību. Augstsprieguma 110 un 330 kV GEL būvniecībā galvenokārt izmanto dažādu materiālu un konstrukciju kailvadus – tēraudalumīnija kailvadus (sk. 1.6. att. a)), aizsargtrošes – tērauda

trošes (sk. 1.6. att. b)) vai optisko šķiedru kabeļus (OPGW) (sk. 1.6. att. c)). Taču pēdējā laikā par aktuālu jautājumu kļuvusi augsttemperatūras vadu ar kompozītmateriāla serdeni (HTLS) izmantošana (sk. 1.6. att. d)).

Vadus uz balstiem izvieto dažādos veidos; piemēram, vienķēdes līnijās tos parasti izvieto trijstūra veidā. Kas attiecas uz vadu stiprināšanu pie balstiem, tad tas atkarīgs no vadu izvietojuma uz izolatora.



1.6. att. GEL vadi un aizsargtrošes: a) tēraudalumīnija kailvadi; b) tērauda trose;
c) OPGW; d) HTLS

Pie GEL ar izolētiem vadiem priekšrocībām salīdzinājumā ar GEL ar neizolētiem vadiem var pieskaitīt izolatoru neesamību uz balstiem, maksimālu balsta augstuma izmantošanu vadu piekāršanai; nav nepieciešamības apgriezt kokus GEL trases rajonā.

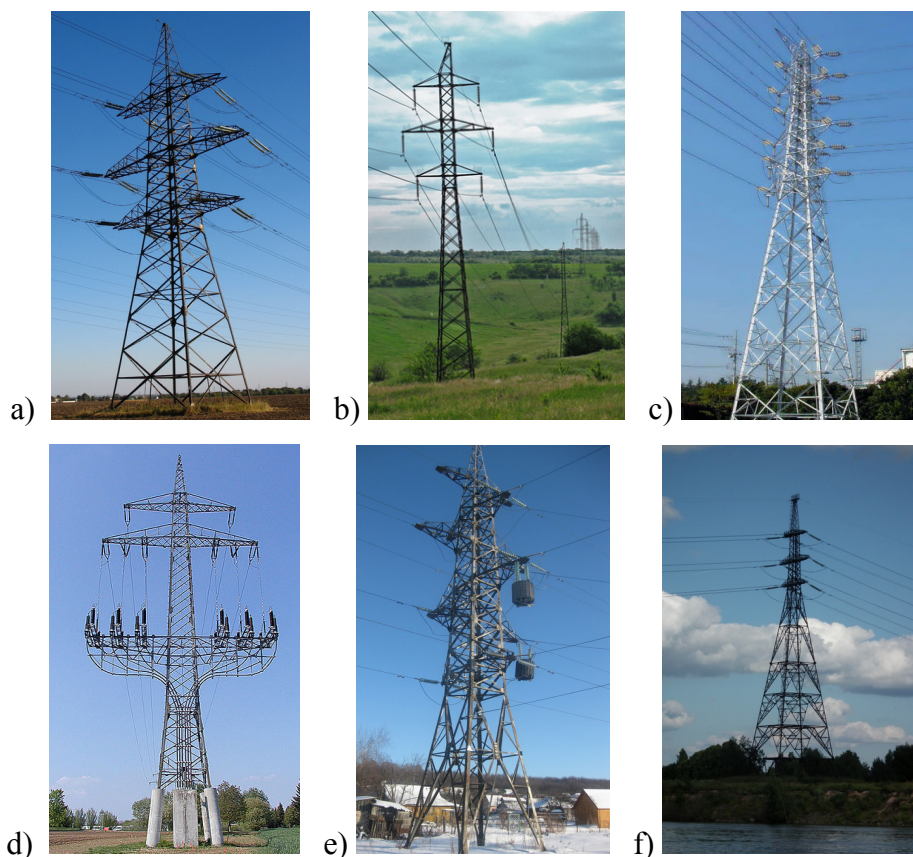
1.2.1.2. GEL pielietojamie balsti

Kā viens no GEL konstruktīviem pamatelementiem noteikti jāmin balsts. Katram balsta tipam atkarībā no vadu šķērsriezuma ir noteikts gabarīta, vēja un svara laidums. Atkarībā no izmantošanas mērķa un uzstādīšanas vietas galvenokārt izšķir šādus GEL balstus [4, 121, 127]:

- enkurbalsts – normālā darba režīmā pilnībā uzņem vadu stiepes slodzi balstiem pieguļošos laidumos, kas ir tikai stingas konstrukcijas (sk. 1.7 a));
- starpbalsts – neuzņem vadu stiepes slodzi vai uzņem to daļēji, var būt gan stingas, gan elastīgas konstrukcijas (sk. 1.7 b));
- stūra balsts, kas uzstādāms GEL virzienmaiņas punktos, turklāt izšķir stūra starpbalstus vai stūra enkurbalstus (sk. 1.7 c));
- gala balsts – uzstāda GEL galos vienpusējai vadu sprieguma uzņemšanai (sk. 1.7 d));
- nozarbalsts – uzstāda GEL nozarojumu izveidei, var būt starpbalstu vai enkurbalstu tipa balsti, savukārt attiecībā uz nozarlīniju tie abos gadījumos ir gala balsti (sk. 1.7 e));

- speciālie vai pārejas balsti, kas uzstādāmi GEL šķērsojumu vietās ar būvēm vai šķēršļiem (upēm, dzelzceļiem, valsts nozīmes ceļiem u.c.) (sk. 1.7 f)).

Iepriekšminētie balsti atšķiras pēc to konstrukcijas un augstuma, un tos izgatavo no metāla, dzelzsbetona vai arī antiseptizētas koksnes. Turklāt uz vieniem un tiem pašiem balstiem var būt piekārti vienas vai vairāku līniju vadi, līdz ar to atkarībā no uzkārtu līniju skaita izšķir vienķēdes un divķēžu balstus.

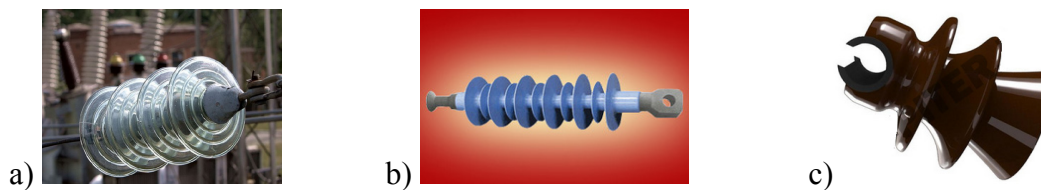


1.7. att. GEL balsti: a) enkurbalsts; b) starpbalsts; c) stūra balsts; d) gala balsts;
e) nozarbalsts; f) pārejas balsts

1.2.1.3. GEL pielietojamie izolatori

Lai stiprinātu līnijas vadus pie balstiem, izmanto izolatorus. Augstsprieguma 110 un 330 kV līnijās visvairāk lieto šķīvja veida stikla piekarizolatorus (sk. 1.8 a)), kā arī polimēra stieņa izolatorus (sk. 1.8 b)), agrāk izmantoja arī stieņa porcelāna izolatorus (sk. 1.8 c)). Pielietojamo izolatoru tipu un skaitu nosaka aprēķinu ceļā projektā atkarībā no vadu maksimālā nostiepuma un vides piesārņojuma pakāpes [19].

Piekarizolatorus komplektē virtenēs, kur izolatoru skaitu nosaka atkarībā no līnijas sprieguma, piemēram, 110 kV GEL izmanto 6-8 izolatorus virtenē.



1.8. att. GEL piekarizolatori: a) stikla; b) polimēra; c) porcelāna

1.2.1.4. Pielietojamā līniju armatūra

Par līniju armatūru sauc tās piekarķēdes daļas, kas kalpo izolatoru virtenes nostiprināšanai pie traversas un vadu piekāršanai virtenei. Pielietojamās armatūras tipu nosaka izolatoru tips, vadu marka un to skaits fāzē. Pēc savas nozīmes GEL vadu instalēšanā armatūra iedalās šādi [4]:

- 1) spaiļes, kas kalpo vadu un trošu piekāršanai un nostiprināšanai enkurbalstos;
- 2) sakabes armatūra: osas, austiņas, skavas, starpposmi un jūgi;
- 3) aizsargarmatūra: gredzeni, ragi, vibrācijas slāpētāji;
- 4) vadu savienošanas armatūra: dažādas savienošanas spaiļes;
- 5) spraišļi, kas kalpo attālumu ieturēšanai starp kūļvadu vadiem.

1.2.1.5. GEL balstu pamati

Pamatu konstrukcija atkarīga no grunts īpašībām, kur šis pamats ierīkojams. Vāji noturīgās gruntīs, arī purvos dažkārt izvēlas pāļu pamatus. Normālās gruntīs izmanto rūpnīcās izgatavotus sēņveida dzelzsbetona pamatus, kā arī ieskrūvējamus metāla un dzelzsbetona pamatus.

1.2.1.6. GEL zibensaizsardzība un zemēšanas ietaises

110 un 330 kV GEL jāaizsargā ar aizsargtrosēm jeb jāizmanto zibensaizsardzība. Aizsargtrosēm jābūt nostiprinātām visos balstos, izmantojot piekarizolatorus, kurus šuntē.

1.2.1.7. GEL galvenie konstruktīvie parametri

GEL piemīt tādi galvenie specifiskie konstruktīvie parametri kā [133]:

- ✓ laiduma garums – attālums pa horizontāli starp balstiem, uz kuriem nostiprināti vadi, kas ir tieši atkarīgs no līnijas sprieguma, turklāt šo lielumu var noteikt precīzāk, zinot izmantojamo balstu tipus, vada marku un šķēsgriezumu, kā arī klimatoloģiskos datus attiecīgajā teritorijā;
- ✓ vada nokare – vertikāla taisne, kas novilkta no vada stiprināšanas punktu iedomātās līnijas blakus balstiem līdz vada nokares zemākajam punktam starp šiem balstiem.

Faktiski šis lielums atkarīgs no balsta tipa, vada markas un šķērsriezuma un aplūkojamā reģiona klimatiskajiem apstākļiem, kur atrodas GEL;

- ✓ gabarīts – minimālais esošais attālums starp vadiem un zemi katrā GEL laidumā un citiem šķērsojamiem energoobjektiem (GEL šķērsojumi savā starpā un ar zemāka sprieguma līnijām, kabeļu līnijām, telekomunikāciju (elektrisko sakaru) līnijām, dzelzceļiem, trolejbusa un tramvaja līnijām, cauruļvadiem un trošu ceļiem (gāzes; naftas un naftas produktu vadiem; amonjaka cauruļvadiem; ūdensvada, kanalizācijas, ūdens noteces, siltumtīkla drenāžas cauruļvadiem), inženierbūvēm (GEL šķērsojumi ar autoceļiem un ielām; ar ēkām, būvēm, sporta, atpūtas, cilvēku pulcēšanās objektiem). Šos gabarītus stingri reglamentē atbilstošā normatīvā dokumentācija, un tie ir tieši atkarīgi no līnijas sprieguma un šādu vietu apmeklēšanas biežuma. Vispārīgā gadījumā GEL ierīkošana veicama pēc projekta, kas savukārt izstrādāts atbilstoši Latvijas būvnormatīviem [1, 5, 6], Latvijas energostandartu prasībām [12], Ministru kabineta noteikumiem [13, 14] un Eiropas Savienības (ES) direktīvām.

Pamatojoties uz iepriekšminēto, var secināt, ka GL konstruktīvie parametri nosaka ne tikai tās darba efektivitāti, bet arī nodrošina aplūkojamā reģiona apkārtējo objektu un cilvēku drošību. Tāpēc EPL būvniecības laikā nepieciešams stingri ievērot spēkā esošos noteikumus.

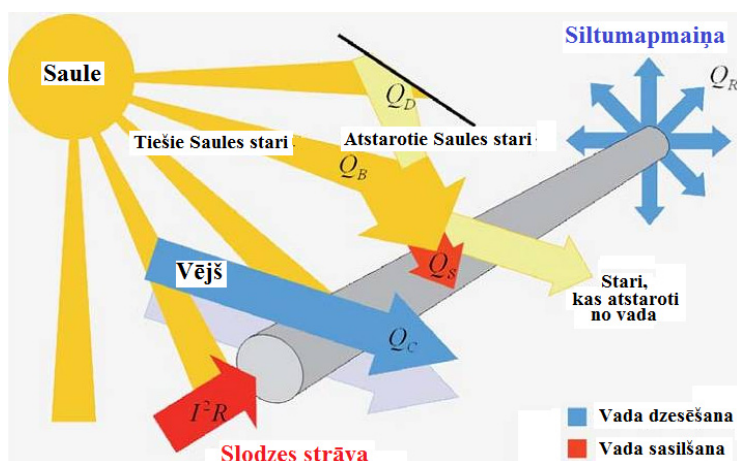
1.2.2. GEL būvniecības galvenie ierobežojumi

Lai atrastu labāko GEL projektēšanas variantu, obligāti jāņem vērā vairāki ierobežojumi, piemēram, termiskie (vada pieļaujamā temperatūra un slodzes strāva), mehāniskie (vada nokare, gabarīts), elektriskie (izolācijas līmenis) un vides (klimatoloģija, elektriskā un magnētiskā lauka ietekme) [38]. GEL projektēšanas laikā nepieciešams nodrošināt maksimālu uzstādīto jaudu, ievērojot GEL pieļaujamo slodzes strāvu, normatīvos gabarītus, kā arī elektriskā un magnētiskā lauka (EL un ML) intensitāti.

Parasti termiskos ierobežojumus nosaka GEL pieļaujamā slodzes strāva un izvēlētajā vada tipa fizikālie raksturlielumi, kas nosaka pieļaujamo vada temperatūru. Lai pārliecinātos par termisko ierobežojumu nosacījumu izpildi, visplašāk izmanto IEEE 786-2006 [109], CIGRE [56], IEC 1597 [98], MT 34-70-037-87 [138] termiskās strāvas aplēses metodes, kurās par teorētiskās bāzes pamatu pieņem labi pazīstamo siltuma bilances vienādojuma līdzsvara stāvokļa jēdzienu (1.1), kas nosaka līdzsvaru starp absorbēto un izkliedēto siltumu, kā arī tos parametrus, kas raksturo LA:

$$Q_s + Q_J = Q_c + Q_R, \quad (1.1)$$

kur Q_s ir sasilšana Saules ietekmē, ko var noteikt orientējoši vai arī tieši izmērīt; Q_J ir sasilšana Džoula efekta ietekmē, kas ir funkcija no slodzes strāvas un vada pretestības; Q_c ir siltuma zudumi konvekcijas rezultātā, kas ir funkcija no vada temperatūras paaugstināšanās virs gaisa temperatūras, vada diametra, vēja ātruma un virziena; Q_R ir siltuma zudumi siltuma izstarošanas rezultātā, kas ir funkcija no temperatūras paaugstinājuma, vada diametra, starojuma koeficienta (sk. 1.9. att.).



1.9. att. GEL vadu visvairāk ietekmējošie faktori

Mehāniskie ierobežojumi galvenokārt ir vada nokare un gabarīts līdz zemei un šķērsojamiem objektiem. Lai veiktu sistemātiskus aprēķinus apskatītajiem vadiem, kā arī noteiktu balstu izvietojumu uz reāla projektējamās GEL modeļa profila, kas balstījās uz GEL apvidus un attiecīgajā reģionā iegūtiem lāzerskenēšanas datiem, tika izmantota speciāla GEL projektēšanas datorprogrammatūra *SAPR LEP* [110].

Vides ietekmes ierobežojumi galvenokārt ir EL un ML, kuri atkarīgi no līnijas sprieguma, slodzes strāvas, vadu augstuma virs zemes EL un ML mērīšanas vietā, kā arī vadu konfigurācijas. Visi EL un ML intensitātes vērtību aprēķini jāveic, izmantojot atbilstošu programmatūru, piemēram, [139], kas tika izmantota šajā darbā.

1.2.3. GEL izbūves izmaksas

Pēdējo gadu laikā nav bijis novērojams būtisks augstsprieguma elektrolīniju apjoma pieaugums, lai gan vairums EPT īpašnieku veikuši lielus ieguldījumus esošo GEL jaudas paaugstināšanā. GEL līniju kopgarums pēdējo piecu gadu laikā ir pieaudzis par 3% (aptuveni 3000 km). Galvenie elektrisko savienojumu paplašināšanās apgabali bijuši šādi [78]:

- Austrija, 380 kV gredzentīkla pabeigšana uz dienvidaustrumiem no Vīnes;
- savienojums starp Grieķiju un Itāliju;
- Spānija, ieskaitot līniju no Madrides uz Aragonu, saites ar Portugāli un vēja ģeneratoru parku pieslēgšanu;
- Zviedrija, zemjūras kabelis uz Poliju;
- Apvienotā Karaliste, zemjūras kabeļi uz Menas salu un Ziemeļīriju.

Nesen veikta izpildītu būvobjektu izmaksu apskata rezultātā, kas izklāstīts [78], var minēt šādus būtiskus GEL projektus:

- ✓ 155 km vienķēdes GEL Somijā ar izmaksām 183 000 EUR/km;
- ✓ 3 GEL Grieķijā (2 maiņstrāvas un 1 līdzstrāvas) ar kopgarumu 300 km, kuru ekvivalentās izmaksas ir no 165,000 EUR/km līdz 250,000 EUR/km;
- ✓ vairāki objekti Portugālē un Spānijā, gan projekta stadijā, gan pabeigti, kuru izmaksas ir no 250,000 līdz 390,000 EUR/km;
- ✓ 66 km 400 kV GEL (ieskaitot transformatorus) Zviedrijā ar izmaksām aptuveni 450,000 EUR/km;
- ✓ 130 km 400 kV GEL Francijā ar izmaksām 576,000 EUR/km;
- ✓ 108 km GEL Austrijā ar izmaksām aptuveni 685,000 EUR/km;

Apvienojot informāciju par nesen veikto GEL projektu izmaksām uz 1 km, ko snieguši energouzņēmumi – EPT īpašnieki, regulētāji un piegādātāji, tika izveidots izbūves izmaksu modelis, saskaņā ar kuru tiek piemērotas noteiktas izmaksas katrai iekārtu kategorijai (ieskaitot atsavināšanas un projektēšanas izmaksas). Pieņemot, ka 380 kV GEL jāpārvada 1000 MW jauda kā bāzes gadījums, iegūtie aprēķinu rezultāti rāda, ka vienķēdes 380 kV GEL izbūves izmaksas ir 251000 EUR/km, divķēžu 380 kV GEL – 401600 EUR/km, vienķēdes 220 kV GEL – 168200 EUR/km, divķēžu 220 kV GEL – 269000 EUR/km, kas uzskatāmas par samērā zemām salīdzinājumā ar 400 kV līdzstrāvas kabeļa izmaksām, kas ir 2008000 EUR/km [78].

1.3. Jaunās tehnoloģijas GEL projektos

Elektropārvades sistēmas attīstībā nozīmīga loma atvēlēta inovatīvu pārvades tehnoloģiju izmantošanai ar mērķi paaugstināt esošās energosistēmas „vieduma” pakāpi, padarot to elastīgāku un reaģētspējīgāku uz pēkšņām apstākļu izmaiņām, spējīgu apstrādāt

lielus mainīgas ģenerācijas apjomus, kā arī pamatā nodrošināt optimālu un ekonomiski rentablu EPT paplašināšanu.

Lai uzlabotu ierobežoto elektrolīnijas jaudu un energosistēmas drošumu, mazinātu ietekmi uz vidi GEL projektēšanas, būves un ekspluatācijas laikā, kā arī mazinātu kapitālieguldījumu apjomu, tika izstrādātas un ieviestas jaunas, modernas EPT un GEL projektēšanas tehnoloģijas, lai varētu darboties viedā tīkla perspektīvo iespēju ietvaros. Turklāt sakarā ar zemes cenas paaugstināšanos, augstām prasībām attiecībā uz drošumu, vadības un enerģijas saglabāšanas automatizācijas jautājumiem, kā arī stingrāku vides aizsardzības politiku lielpilsētās un aglomerācijās radās nepieciešamība pēc kompaktām, videi draudzīgām elektroenerģijas iekārtām ar augstu regulēšanas pakāpi. Rezultātā jaunas, modernas tehnoloģijas ļauj enerģijas uzņēmumiem atrisināt vairākas pastāvošas problēmas. Moderno energosistēmu ekspluatācijas nosacījumus raksturo pārvadāmās enerģijas blīvuma pieaugums kā normālā, tā avārijas režīmā, kā arī nepieciešamība pēc elektroinfrastruktūru kompaktām versijām [124].

EPT caurlaides spējas un drošuma paaugstināšanos var panākt, kombinējot ET tiešus tehniskus pastiprināšanas pasākumus (jaunas būves un plaša jaunu tehnoloģiju izmantošana) ar netiešiem informācijas un regulēšanas pastiprinājumiem, kas ļauj uzlabot EPT vadību un infrastruktūru. Stratēģiski lēmumi attiecībā uz šiem diviem pastiprināšanas pasākumiem ir funkcija no tīkla vadības, kas ietver EPT vajadzību atpazīšanu, šo vajadzību nodrošināšanai pieejamo iespēju izvērtēšanu un jauno pārvades aktīvu un jauno ekspluatācijas metožu sabalansēšanu, proti, ET plānošana, attīstība un ekspluatācija. Netieša ET pastiprināšana ietver tās vadības uzlabošanu ar jaunu tehnoloģiju palīdzību. Vēsturiski elektropārvades sistēmas ekspluatācija notika ar ļoti nelielu pieejamo reāllaika informācijas daudzumu par tās stāvokli. Pēdējo desmit gadu laikā jaunumi datoru un komunikācijas tehnoloģijās, piemēram, SCADA (Dispečervadība un datu vākšana) un EMS (Enerģijas vadības sistēma), ir lielā mērā uzlabojuši datu pārraides iespējas. Tagad gandrīz jebkurā vadības centrā ir pieejami būtiski reāllaika dati, un daudzi centri spēj veikt sarežģītu tiešsaistes ET analīzi. Tomēr, neskatoties uz šiem uzlabojumiem, joprojām pastāv problēmas, piemēram, nepieciešams savākt papildu datus vadības centrā un darīt tos zināmus visiem tirgus dalībniekiem, izstrādāt kompleksi aptverošus algoritmus, lai noteiktu energosistēmu darbības limitējošās robežas, tādējādi pietuvojoties to racionālajai funkcionēšanai un vadības iespējām reālā laikā, kā arī sasniedzot

nepieciešamās labākas vizualizācijas metodes informācijas datu atspoguļošanai operatoriem [74].

1.3.1. Jauno tehnoloģiju galvenie virzieni

Pirms aplūkosim EPT jauno tehnoloģiju plašo klāstu, vispirms nepieciešams izskatīt pastāvošās tradicionālās metodes, piemēram [115]:

a) GEL vadu vai pamatiekārtu nomaiņa – ja esošais EPL vads nespēj pārvadīt paredzamo jaudu, tad pastāv iespēja nomainīt esošo vadu ar lielāka šķērsriezuma un augstas caurlaides spējas vadiem, kas var būt ekonomiski pamatots risinājums, ja nav nepieciešama būtiska GEL balstu pārbūve, pielāgojoties lielākai noslodzei no smagākiem vadiem. Turklāt GEL slodzes strāvu var ierobežot novecojušas pamatiekārtas, kuras pēc nepieciešamības var nomainīt vai modernizēt;

b) EPL darba sprieguma paaugstināšana – šajā gadījumā līnijas nominālo strāvu iespējams paaugstināt par tik procentiem, cik ir piemēroti, izmantojot vienu un to pašu vadu. Šāda uzlabojuma rezultātā var rasties nepieciešamība pēc balstu rekonstrukcijas, lai nodrošinātu atbilstošus standarta gabarītus. Papildus tam nepieciešams modernizēt arī elektrosadalietaises un apakšstacijas, uzstādot augstāka sprieguma jaudas slēdžus, slēdžus, transformatorus un citas līdzīgas iekārtas;

c) jaunas GEL būve – šāda darbība palīdzēs atvieglot esošās energosistēmas pārslodzi un daļēji atslogot EPT „šaurās vietas”, radot papildus enerģijas plūsmas ceļus, kā arī paaugstinot sistēmas drošumu. Tomēr GEL projektēšana ir saistīta ar virkni ievērojamu tehnisku, ekoloģisku un ekonomisku problēmu, kas prasa ievērojamus kapitālieguldījumus;

d) esošās vienķēdes GEL pārveide par divķēžu GEL – šāda iespēja paredz esošā balsta nomaiņu ar jaunu divķēžu balstu vai pastāvošā balsta rekonstrukciju, pievienojot šim balstam otru EPL ķēdi. Ja pastāv iespēja esošā zemes atsavinājuma ietvaros uzbūvēt jaunu paralēlu GEL, tas ļautu ietaupīt dārgus trašu pētījumus un novērst zemes iegādes problēmas;

e) GEL garenkompensācijas izmantošana, uzstādot virknē slēdzamus kondensatorus, ļautu paaugstināt energosistēmas strāvas pārvades spēju.

f) šunta reaktīvo ierīču izmantošana, kuras ļauj paaugstināt energosistēmas spriegumus, tādējādi paaugstinot papildus jaudas pārvadi;

g) fāžu pārslēgšanas ierīču ieviešana, kuras sniedz iespējas labākai jaudas plūsmas regulēšanai energosistēmā, kā arī uzlabo tās stabilitāti.

Attīstoties jaunām, modernām EPT tehnoloģijām, rodas nepieciešamība modernizēt esošo ET, galvenokārt sakarā ar nepietiekamu esošo GEL papildu pārvades jaudu.

Saskaņā ar [26] galvenās modernās tehnoloģijas var iedalīt 4 galvenajās apakšgrupās: pasīvās iekārtas, aktīvās iekārtas, reāllaika sistēmu kontroles iekārtas (RT), kā arī PSO darbību ietekmējošās iekārtas (ITO). Pasīvās iekārtas, kuras galvenokārt saistītas ar augstsprieguma maiņstrāvas (HVAC) pārvades ierīcēm, ietver: šūtā polietilēna (XLPE) pazemes kabeļus, gāzizolētas līnijas (GIL), augsttemperatūras mazas nokares (HTLS) vadus, augsttemperatūras (HTS) kabeļus, HVAC līnijas, kas aprīkotas ar inovatīviem balstiem.

Aktīvās iekārtas spēj aktīvi regulēt ET, tajā pašā laikā paaugstinot pārvades sistēmas jaudu, uzlabojot sistēmas stabilitāti. Šo tehnoloģiju skaitā minamas tādas ierīces kā sprieguma šķērsregulēšanas transformatori (PST), augstsprieguma līdzstrāvas iekārtas (HVDC), elastīgā maiņstrāvas pārvades sistēma (FACTS) un īsslēguma strāvas ierobežotāji (FCL).

Reāllaika sistēmas kontroles iekārtas balstās uz sarežģītiem aparatūras un programmatūras komponentiem, ko izmanto, lai nolasītu atsevišķo sistēmas komponentu slodzes un galveno ierobežojošo parametru vērtību robežas reālā laikā, kā arī novērotu sistēmas vispārējo stāvokli, tajā pašā laikā dinamiski kontrolējot GEL slogojamības ierobežojumus apskatāmā reģiona mērogā. Šo tehnoloģiju skaitā minamas globālā monitoringa un vadības sistēmas (WAMC) un reāllaika termiskās strāvas (RTTR) regulējamās līnijas, sniedzot iespēju dinamiski palielināt GEL caurlaides spēju, regulējot vadu temperatūru.

PSO darbību ietekmējošās iekārtas, kas balstītas uz vairākām jaunām tehnoloģijām, ko paredzēts darbināt veidojamajās sadales sistēmās un kuras ietekmē PSO darbību (piemēram, viedās mērierīces), kā arī elektroenerģijas uzkrāšanas tehnoloģijas (piemēram, sūkņēšanas hidroelektriskā uzglabāšana (PHS), saspiestā gaisa enerģijas uzglabāšana (CAES), spararata enerģijas uzglabāšana (FES), supravadītspējas magnētiskā enerģijas uzglabāšana (SMES), nātrija – sēra (Na-S) baterijas).

Tālāk aplūkosim katru no šīm tehnoloģijām detalizētāk.

1.3.2. Pasīvo iekārtu pārskats

Šeit tiks aplūkotas iepriekš minēto pasīvo iekārtu vispārīgās funkcijas, kuras saistītas ar HVAC elektropārvades ierīcēm.

1.3.2.1. XLPE pazemes kabeļi

Pazemes un zemjūras XLPE kabeļu izmantošana piedāvā lielas iespējas pārvades sistēmai, tomēr, neskatoties uz nesen notikušo šādu iekārtu tehnoloģisko progresu un zināmā mērā to izmaksu samazinājumu, pastāv XPLE kabeļu izmaksu barjera salīdzinājumā ar esošajiem tradicionālajiem risinājumiem, kas joprojām ir augsta un, kā sagaidāms, tāda arī paliks sakarā ar šai tehnoloģijai raksturīgo augstāko sarežģītības pakāpi un montāžas ierobežojumiem.

1.3.2.2. GIL

GIL pamatstruktūrā ir vads, kas atrodas zem augsta spiediena, izvietots iezemētā vadītspējīgā korpusā, un telpa starp šiem abiem elementiem ir pildīta ar gāzi zem spiediena, tādējādi veidojot elektroizolāciju. Vadus noteiktā vietā notur masīvi balstizolatori. Katras fāzes vadi var būt izvietoti atsevišķos korposos. Tiek nodrošināta termiskās izplešanās kompensācija, bieži ar slīdkontaktiem vadā un, kur korpusā spēj brīvi kustēties (t.i., tuneļa vai plaukta tipa konstrukcijās), – ar plēšām. GIL tās garumā ir sadalīta atsevišķos gāzes nodalījumos [106].

Šai tehnoloģijai piemīt vairākas priekšrocības, piemēram, zemi pārvades zudumi, zema kapacitīvā slodze, augsts personāla drošības līmenis, nenotiek materiālu elektriskā un termiskā novecošanās, elektromagnētiskā lauka (EML) ietekmes būtisks samazinājums, darbība un nominālā jauda kā GEL [86]. Patlaban visgarākā GIL ķēde izveidota Japānā Sinmeikas – Tokai saites vajadzībām; ķēde projektēta 2850 MW lielas jaudas pārvadīšanai ar 275 kV spriegumu 3,3 km garumā. Eksploatācijā ir ieviestas arī citas, īsākas GIL ķēdes (daži simti metru). Visas GIL ķēdes uzstādītas tuneļveida konstrukcijās vai virszemes veidā. Nesenākie GIL saišu piemēri Eiropā ir līnijas, kas uzstādītas Vācijā (Frankfurtes lidostā) un Šveicē.

1.3.2.3. HTS kabeļi

Kriogēna šķidruma izmantošana augstsprieguma kabeļa dzesēšanai sniedz ievērojamas priekšrocības tikai tādā gadījumā, ja zudumi vadā supravadītāju izmantošanas rezultātā samazinās līdz nullei vai ir tuvi šai vērtībai. Šīs priekšrocības ir šādas: zemāki elektriskie zudumi, augstākas elektriskā lietderības koeficienta vērtības un augstāka atsavinājuma pakāpe sakarā ar augstāku jaudas blīvumu noteiktā sprieguma līmenī. Kopumā supravadītāji iedalās 2 klasēs: zemas temperatūras un augsttemperatūras supravadītāji (LTS un HTS). LTS kabeļiem ir kritiskās temperatūras, kas zemākas par aptuveni -233°C (40 K). HTS kabeļu

kritiskās temperatūras ir augstākas par aptuveni -233°C (40 K), un tie izgatavoti no kuprātu keramikas. Turklāt, ekspluatējot supravadītājus, pastāv ne tikai šādu kabeļu temperatūras ierobežojumi, bet arī ML un strāvas blīvumu kritiskās robežas. Tomēr kriogēno dzesēšanas iekārtu izmaksas un izmēri joprojām paliks ievērojams šķērslis HTS kabeļu plašai izmantošanai, tādējādi nepieciešami tālāki pētījumi šajā jomā, kas tuvākajā nākotnē spētu nodrošināt šādas tehnoloģijas attīstību un plašu izmantošanu [106].

1.3.2.4. HTLS vadi

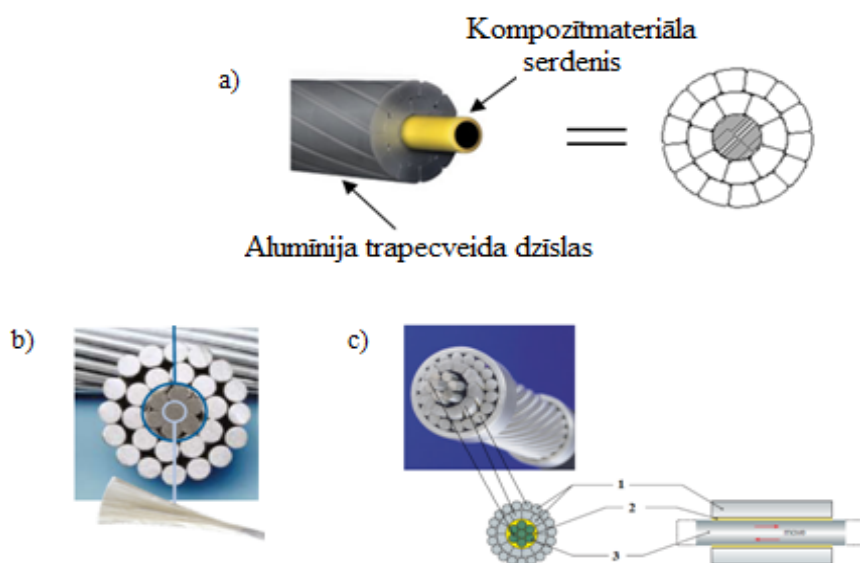
Sākotnējo ACSR vadu nomaiņa aptuveni ar tā paša diametra HTLS vadiem ir viens no iespējamajiem risinājumiem, lai paplašinātu GEL termiskās strāvas pieļaujamās robežas, kā arī paaugstinātu ET ekspluatācijas efektivitāti un drošumu ar mērķi paaugstināt lietderīgos kapitālieguldījumus EPT. HTLS vadu tipi ir efektīvi, jo tie, pirmkārt, spēj ilgstoši darboties augstās temperatūrās virs 100°C , nezaudējot vada stiepes stiprību, tādējādi palielinot GEL caurlaides spēju; otrkārt, šiem vadiem pastāv mazākas nokares augstās temperatūrās, kas ļauj, nepaaugstinot un nepārbūvējot balsta konstrukciju, ievērot visus nepieciešamos normatīvos gabarītus līdz zemei un šķērsojamiem objektiem [88, 58]. Pastāv vairāki HTLS vadu tipi, piemēram, ACCC, ACCR, GTACSR, kas parādīti 1.10. attēlā [41].

ACCC vads sastāv no hibrīda oglekļa un stikla šķiedras serdeņa, kas apvilīts ar trapecveida formas alumīnija dzīslām (sk. 1.10. att. a)). Izturīgs stiepes serdenis uztver lielāko vada mehāniskās slodzes daļu, vienlaikus pilnīgi atlaidinātas alumīnija dzīslas uztur visu vada elektrisko strāvu. Oglekļa šķiedras nodrošina ārkārtīgi augstu stiepes izturību un zemu termiskās izplešanās koeficientu, savukārt stikla šķiedra uzlabo serdeņa lieces izturību, nodrošina triecienizturību, kā arī novērš galvanisko reakciju starp oglekļa šķiedras un alumīnija dzīslām [53]. ACCC vada kompozītmateriālu serdenis ir daudz vieglāks un izturīgāks nekā parastie ACSR vai augstas izturības tērauda serdeņi. To vieglums ļauj iekļaut no 20% līdz 30% vairāk alumīnija (strāvu vadošais materiāls) bez jebkāda papildu svara. Izmantojot kompakta trapecveida formas alumīnija dzīslas, var izvairīties no jebkāda diametra palielinājuma. Tā rezultātā vads nodrošina augstāku GEL caurlaides spēju un zemākus kapitālieguldījumus, kā arī ACCC vadam piemīt lielāka izturība, turklāt ir nepieciešami mazāki celtniecības materiālu apjomi, būvējot jaunas GEL [68].

ACCR tipa vads veidots tikai no alumīnija un tā savienojumiem. Serdeņa kūlī sastāv no dzīslām, kas izgatavotas no alumīnija oksīda šķiedrām, kam apkārt atrodas augstas tīrības pakāpes alumīnijs (sk. 1.10. att. b)). Šī tipa materiāls tiek saukts par metāla matricu ar šķiedru

pastiprinājumu, Tā sastāvā nav ne polimēru, ne plastmasas. ACCR serdenis ir revolucionārs alumīnija sakausējums, kuram piemīt tāda stiprība un stingums kā tēraudam, taču zemāks termiskās izplešanās koeficients un mazāks svars. Serdenis sastāv no alumīnija kompozītmateriāla dzīslām, kam apkārt atrodas rūdīts alumīnija un cirkonija sakausējums, kas izturīgs pret augstu temperatūru. Alumīnija un cirkonija sakausējumu iespējams karsēt līdz augstām temperatūrām, tam nekļūstot mīkstākam. Tādējādi, kad alumīnija un cirkonija sakausējums atdziest līdz vides temperatūrai, tas saglabā alumīnijam raksturīgo mehānisko izturību un uzrāda labākas darbības augstā temperatūrā nekā alumīnijs [68].

Attiecībā uz GTACSR vadiem jāteic, ka tas ir unikāls vadu veids, lai uzlabotu esošas elektropārvades līnijas caurlaides spēju, vienkārši nomainot esošos ACSR vadus. GTACSR vadiem ir ar smērvielu pildīta sprauga starp serdeni un alumīnija dzīslām, tādējādi sakarā ar savu noturību augstā temperatūrā alumīnija dzīslas var slidēt gar serdeni. Rezultātā visu slodzi uzņem serdenis, kad vada temperatūra pārsniedz montāžas temperatūru (sk. 1.10. att. c)) [69].

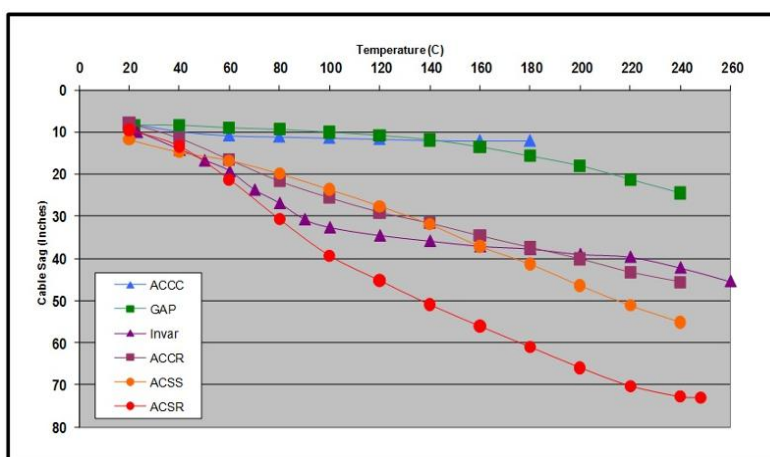


1.10. att. a) ACCC vada; b) ACCR vada; c) GTACSR vada šķērsgriezums

Neskatoties uz HTLS vadu tipu priekšrocībām, to izmaksas pārsvarā ir augstākas (dažos gadījumos daudz augstākas) nekā tradicionālo ACSR vadu izmantošanas gadījumā, tomēr šis tehniskais risinājums var būt ekonomiski pamatotāks, ja šādu vadu tipu cenas tiktu samazinātas.

Vērts atzīmēt, piemēram, ka saskaņā ar ASV Enerģētikas informācijas administrācijas (*Energy Information Administration*) datiem pasaulē patērē vairāk nekā 20 triljonu kilovatstundu elektroenerģijas gadā. Aptuveni 7% no visas saražotās elektroenerģijas zūd vados (galvenokārt vadu pretestības dēļ), kā rezultātā ik gadu rodas 1,4 triljonu kWh lieli

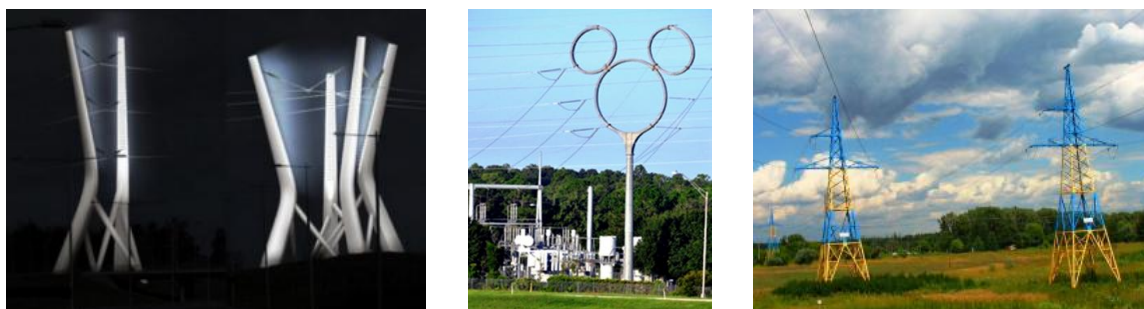
zaudējumi. Tā kā ACCC vadiem ir mazāka pretestības, tiek samazināti arī zudumi līnijā par 25-40% (vai vairāk) atkarībā no elektriskās slodzes. 2005. gadā uzņēmums *Hydro One* veica salīdzinošu izmēģinājumu vairākiem vadu veidiem. Izmēģinājuma laikā pa *Drake* izmēra vadiem tika vadīta 1600 A strāva, lai noteiktu šo vadu nokares lielumus. ACCC tipa vads ne tikai uzrādīja vismazāko termisko nokari, tam bija arī par 60 – 80 °C zemāka temperatūra nekā jebkuram no izmēģinātajiem ekvivalenta diametra vadiem (sk. 1.11. att.). Zudumu GEL samazināšana par 1/3 ļautu ietaupīt 400 miljardus kWh gadā [73].



1.11. att. HTLS vadu tipu temperatūras – nokares atkarības raksturojums

1.3.2.5. HVAC līnijas, kas aprīkotas ar inovatīviem balstiem

Šāda veida darbības izvēršanu pieaugošā mērā atbalsta PSO, lai samazinātu GEL negatīvo iedarbi uz vidi, piemēram, to vizuālo iedarbību un EML kaitīgās ietekmes apmēru. Lai risinātu minētās problēmas, tiek izstrādātas un piedāvātas videi draudzīgas balstu konstrukcijas, kas piešķirs GEL jaunu izskatu. Paredzams, ka izmaksu starpību kompensēs priekšrocības, kas saistītas ar šādu GEL apkopi, jo šāda veida būves ir mazāk pakļautas konstruktīviem bojājumiem un sabiedrība tos uztver zināmā mērā draudzīgāk (sk. 1.12. att.) [112, 140].



1.12. att. Videi draudzīgas balstu konstrukcijas

1.3.3. Aktīvo iekārtu pārskats

Šeit apskatītas aktīvās iekārtas, ar kuru palīdzību var aktīvi regulēt ET.

1.3.3.1. PST

Sprieguma šķērsregulēšanas transformatorus izmanto, lai paaugstinātu jaudas plūsmas pārvades spēju un palīdzētu uzlabot sistēmas stabilitāti, kā arī regulētu aktīvās jaudas plūsmas starp dažādiem tīkliem paralēlām GEL vai paralēliem kabeļiem [27]. To panāk, izmantojot fāzregulatoru, palielinot jaudas plūsmas pa konkrētām EPL vai arī ierobežojot tās, lai nepieļautu nepieņemamas ietekmes uz citiem pārvades sistēmas īpašniekiem, kas varētu ierobežot konkrētās sistēmas caurlaides spēju [115]. Turklāt pārrobežu enerģijas tirdzniecības un atjaunojamās enerģijas ģenerācijas integrēšana palielinās nepieciešamību pēc šādas tehnoloģijas, kas, iespējams, būtu darbināma ar energoelektronikas palīdzību un tiktu pastiprināta ar saskaņotiem vadības protokoliem, kas tiktu īstenoti PSO savstarpējās koordinācijas centru ietvaros [26].

1.3.3.2. FCL

Īsslēguma strāvas var radīt nopietnus bojājumus, pārtraucot elektroenerģijas piegādi starp energoobjektiem un patērētājiem, kā arī bojāt pārvades un sadales iekārtas, radot nepieciešamību pēc dārga un laikietilpīga remonta. FCL regulē strāvu, kas plūst cauri pārvades un sadales sistēmām nenormālos darba apstākļos, tādējādi uzlabojot energoapgādes sistēmu drošību, stabilitāti un efektivitāti, kā arī pagarinot a/st. iekārtu darbмūžu, kas savukārt samazina pārvades un sadales ierīču ekspluatācijas un pat nomaiņas izmaksas. FCL spēj ieņemt centrālu vietu esošā ET pārveidošanā, lai izveidotu viedāku un efektīvāku EPT [124].

1.3.3.3. HVDC

HVDC GEL galvenokārt izmanto gadījumos, kad jāpārvada liela elektriskā jauda lielos attālumos virs zemes un regulējamā veidā ar minimāliem maiņstrāvas zudumiem. Tātad HVDC pārvadi izmanto zemūdens līnijām vai savienojot jūrā izvietotus vēja ģeneratoru parkus ar sauszemi, vai arī pārvadot elektroenerģiju lielā attālumā pa jūru, kur GEL izmantošana nav iespējama. Tomēr HVDC kabeļus sāk izmantot arī virszemes elektropārvades objektiem kā jau pārbaudītu tehnoloģiju, savienojot asinhronos ET [62].

HVDC kabeļi efektīvāk funkcionē pārvadei lielos attālumos nekā HVAC kabeļi, īpaši pie lielām jaudām. Piemēram, HVDC ir raksturīgs mazāks Džoula sasilšanas efekts vados nekā, izmantojot HVAC tehnoloģiju; turklāt HVAC kabeļiem nepieciešams noteikt nominālo

kapacitīvo uzlādes strāvu līdztekus pārvadamajai aktīvajai strāvai, kamēr HVDC kabeļiem kapacitīvās uzlādes strāvas nav, t.i., visa kabeļa elektropārvades spēja ir izmantojama aktīvās jaudas pārvadei; vienserdeņa HVAC zemjūras kabeļu bruņām jāizmanto nemagnetizējošs materiāls, kas ļauj izvairīties no feromagnētiskiem zudumiem, līdz ar to šeit izmanto vara vai alumīnija sakausējumu vai nemagnētiska nerūsējošā tērauda stieples, savukārt HVDC kabeļiem magnētisko zudumu nav, tādējādi bruņām var izmantot cinkota tērauda stieples, kurām ir labākas stiepes īpašības un mazāks svars salīdzinājumā ar vara stieplēm [111]. Pašreiz HVDC pārvadi izmanto vairāk nekā 70 energoobjektos dažādās pasaules vietās. Lielākā šobrīd darbībā esošā shēma ar zemjūras kabeļiem ir ar 2000 MW jaudu; mazākā shēma ir ar aptuveni 50 MW nominālo jaudu.

1.3.3.4. FACTS

Ar FACTS iekārtām enerģētikā saprot tehnoloģijas, kas paaugstina EPT drošību, pārvadamā jaudu un elastīgumu [63]. FACTS risinājumi palīdz enerģētikas uzņēmumiem palielināt esošo maiņstrāvas elektrolīniju caurlaides spēju, nodrošinot operatīvu sprieguma, aktīvās jaudas un slodzes strāvas plūsmas regulēšanu tīklveida energosistēmās. FACTS galvenais mērķis ir pēc iespējas maksimāli samazināt „šaurās vietas” pastāvošajās elektropārvades sistēmās un uzlabot energoapgādes pieejamību, drošumu, stabilitāti un kvalitāti. Turklāt FACTS tehnoloģija nodrošina alternatīvu jaunu EPL vai enerģijas ražošanas objektu būvei, kas ir dārgs un laikietilpīgs process. Tas ir salīdzinoši lēts un ātrs veids, kā paaugstināt pārvadamā jaudu un regulēšanas iespējas esošajos ET ar minimālu ietekmi uz vidi.

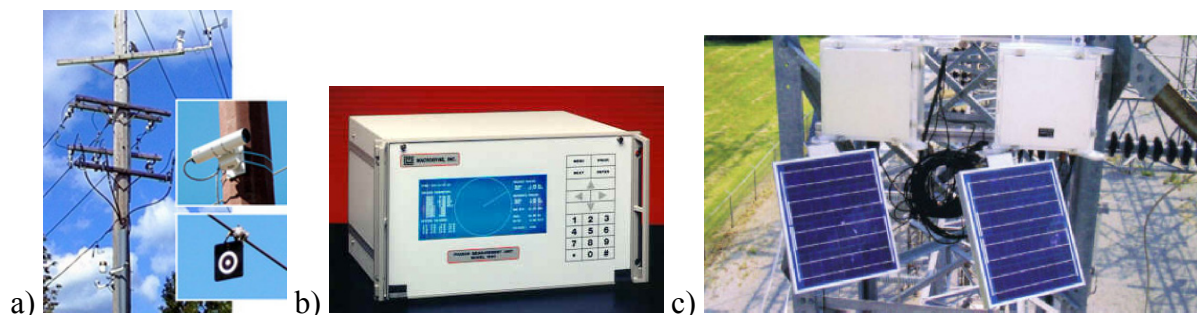
FACTS iekārtas pēc to slēgšanas veida var iedalīt 3 pamattipos [106, 135]:

- ✓ paralēli slēgtās iekārtas – statiskais reaktīvās jaudas kompensators (SVC), statiskais sinhronais kompensators (STATCOM), kas ir visizplatītākās un labāk attīstītās FACTS tehnoloģijas un sniedz būtiskas iespējas reaktīvās jaudas kompensācijai un sprieguma regulēšanai;
- ✓ virknē slēgtas iekārtas – kondensatoru baterija ar tiristora vadību (TCSC), statiskais sinhronais garenkompensators (SSSC), kuras sniedz galvenās priekšrocības aktīvās jaudas plūsmas regulēšanai un pārejas stabilitātes uzlabošanai;
- ✓ kombinētās iekārtas – sprieguma šķērsregulēšanas transformators ar tiristora vadību (TCPST), energoplūsmu dinamiskā vadības sistēma (DFC), starpsaišu jaudas plūsmu vadības sistēma (IPFC), energoplūsmu unificētā vadības sistēma (UPFC).

No PSO skatpunkta izmaksu, sarežģītības un drošuma jautājumi pašlaik ir galvenie šķēršļi šo daudzsološo tehnoloģiju integrācijai.

1.3.4. Reāllaika tehnoloģijas apskats

RTTR ir samērā labi attīstīta tehnoloģija, kas balstās uz GEL termiskās strāvas reāllaika monitoringu, ievērojot pastāvošos GEL projekta ierobežojumus, tādējādi mazinot iespējamās esošā EPT pārslodzes problēmas. Kā piemēri minami dinamiskā termiskās strāvas monitoringa sistēma (DTCR) [103], nokares mērītājs *Video Sagometer* [59] (sk. 1.13. att. a)) un diferenciālā globālās pozicionēšanas sistēmas (GPS) nokares kontrole [84], kur nokare tiek mērīta reālā laikā; fāzes mērīšanas ierīču (PMU) tīkls [75] (sk. 1.13. att. b)), kas atbalsta ekspluatācijas nosacījumu kontroli reālā laikā un automatizētu reakciju uz ET bojājumiem [48]; GEL temperatūras monitorings [71]; GEL strāvas monitorings [29, 105] (sk. 1.13. att. c)), kas sniedz daudz priekšrocību EPT [42]. Turklāt šīs tehnoloģijas ļauj PSO reālā laikā iegūt EPT darba stāvokļa vizuālu un cita veida informāciju, lai varētu izmantot ET pastāvošo pārvades jaudu un GEL caurlaides spēju, kā arī paaugstinātu kopējās pārvades energosistēmas efektivitāti, kas ļauj veikt vēlamā elektroenerģijas apjoma piegādi pēc patērētāja pieprasījuma [89].



1.13. att. Reāllaika tehnoloģijas: a) *Video Sagometer*; b) PMU; c) GEL strāvas monitoringa sistēma

WAMC ir informācijas platforma, kas sniedz iepriekšminētām reāllaika tehnoloģijām svarīgas kontroles iespējas. Balstoties uz PMU, WAMC ļauj kontrolēt pārvades sistēmas darba apstākļus plašās robežās ar mērķi noteikt EPT dažādu darba režīmu nestabilitātes gadījumus un tālāk cīnītos pret tiem. Rezultātā, izmantojot šādu savlaicīgās brīdināšanas sistēmu, tiek paaugstināts energosistēmas drošums, ļaujot izvairīties no nopietniem EPT bojājumiem un optimizējot GEL infrastruktūras izmantošanu. Tomēr, lai varētu pilnīgi izvērtēt WAMC sniegtās priekšrocības, būs nepieciešama izmantojamo datu apstrādes

standartu ieviešana, liela mēroga demonstrējumi, iespējams, kombinācijā ar citām EPT aktīvajām iekārtām [26, 57].

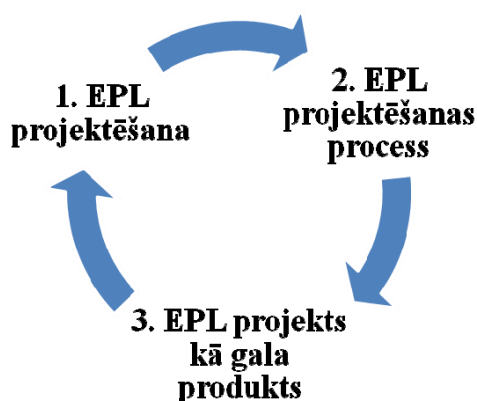
1.3.5. PSO darbību ietekmējošo iekārtu pārskats

PSO darbību ietekmējošās iekārtas balstās uz dažām jaunām tehnoloģijām, kas pašlaik atrodas attīstības stadijā esošajās sadales sistēmās un kas ietekmē PSO darbību (piemēram, viedie mērinstrumenti) un elektroenerģijas uzglabāšanas tehnoloģijas, piemēram, PHS, CAES, FES, SMES un Na-S baterijas. Tomēr pastāv ar šādu tehnoloģiju saistīti gan tehniskie, gan tiesiskā regulējuma jautājumi, kuri jārisina tagad, ievērojot enerģētikas nākotnes vīziju. Rezultātā izriet secinājums, ka uzglabāšanas risinājumu liela mēroga demonstrējumu īstenošana Eiropas līmenī ir nepieciešams solis, lai validētu gan uzglabāšanas iekārtu priekšrocības, balstoties uz ievērojamu pētījumu bāzi, gan potenciālās infrastruktūru īpašumtiesību regulējuma iespējas, lai regulētu uzglabāšanas risinājumu ieviešanas un darba procesu [26].

1.4. GEL projektēšanas metodes un rīki

1.4.1. GEL projektēšanas metodes

GEL un EPT projektēšanas uzdevuma būtība ir tādu risinājumu un tehniski ekonomisko pamatojumu izstrāde, kas nosaka to attīstību pie vismazākajiem kapitālieguldījumiem un nodrošina kvalitatīvu elektroenerģijas piegādi patērētājiem, ievērojot pastāvošos tehniskos ierobežojumus. Projektēšana nosacīti ir 3 pamatkomponentu kopums, kuri nepārtraukti savā starpā mijiedarbojas laikā (sk. 1.14. att.).



1.14. att. GEL projektēšanas nosacītās stadijas

Vispārīgā gadījumā EPL projektēšanu var sadalīt trijos galvenajos posmos (sk. 1.14. att.) [145]:

1. EPL projektēšana ir atbildīgs un darbietilpīgs izstrādes process, kurā ietilpst nepieciešamās dokumentācijas izstrāde. Elektrisko sistēmu un tīklu projektēšana sākas ar pamatojuma materiālu izstrādi ET objektu projektēšanas, būves vai rekonstrukcijas ekonomiskās efektivitātes un mērķtiecīguma noteikšanai. Pirmkārt, tiek veikti elektriskie aprēķini dažādiem tīkla darbības režīmiem (aplūkojamās energosistēmas (rajona, pilsētas, objekta) esošā ET analīze, piemēram, patērētāju elektrisko slodžu noteikšana, aktīvās jaudas bilanču sastādīšana pa atsevišķām a/st. un energomezgliem u.c.), pamatojot tīkla uzbūves shēmas izvēli. Otrkārt, statiskās un dinamiskās stabilitātes pārbaudes aprēķini (pamatprasību formulēšana pretavārijas automātikas (PA) sistēmai; reaktīvās jaudas bilances sastādīšana un nosacījumu formulēšana sprieguma regulēšanai tīklā u.c.). Treškārt, projektējamā ET īsslēguma strāvu aprēķini un prasību noteikšana attiecībā uz komutācijas aparatūras atslēgšanas spēju, priekšlikumu izstrāde īsslēguma jaudas ierobežošanai. Ceturtkārt, apkopot dati par paredzēto elektrotīkla attīstības apjomu, fiziskie un finansiālie rādītāji, attīstības sadalījums pa kārtām.

2. EPL projektēšanas process paredz ekonomisko un tehnisko aprēķinu veikšanu, shēmu, grafiku izstrādi, kalkulāciju, tāmju, aprakstu un paskaidrojuma rakstu sastādīšanu. Pēc lēmuma pieņemšanas par EPL būvi jāveic visi nepieciešamie inženierisinājumu izpētes darbi un jāsavāc materiāli, lai iegūtu izejas datus un nodrošinātu tehniski pareizus un ekonomiski pamatotus galvenos projektēšanas, celtniecības un ekspluatācijas risinājumus. Minētie dokumenti izstrādāti, balstoties uz projektēšanas tehnisko uzdevumu un saskaņā ar spēkā esošajiem normatīviem. Šajā stadijā turpmākajā projektēšanas gaitā seko mehāniskie aprēķini, galvenokārt izvēlas GEL optimālo trasi, veic juridisko noformēšanu (saskaņošanu) un izejas materiālu saņemšanu. Pirms izpētes darbiem, izmantojot modernus GEL projektēšanas datorprogrammas nodrošinājumus, veic GEL trases variantu izpēti, ievērojot fiziski ģeogrāfiskos, ģeoloģiskos, hidrauliskos un citus faktorus, galīgo lēmumu pieņemšanu GEL trases virzienam. Izvēlēto GEL trasi saskaņo ar visām ieinteresētajām organizācijām un institūcijām.

3. Projektēšanas gala produkts ir pilnīga projekta izstrāde (tipveida vai individuāla), kas ir norādīto materiālu un dokumentācijas (rasējuma mezglu) komplekts. Pēc pamatojošo materiālu apstiprināšanas uzsāk EPT objektu projektēšanu. Projektēšanas un tāmju

dokumentācijas izstrāde, kurā ietilpst izejas datu izvēle ar EPL raksturojumu, kā arī klimatisko nosacījumu un uzdotā posma profila izvēle; balstu tipa atlase atkarībā no EPL sprieguma klases, klimatiskajiem apstākļiem, profila un teritorijas plāna; izolatoru tipa un skaita izvēle virtenē; balstu izvietošana pa trases profilu; aprēķina režīma izvēle; montāžas grafiku un tabulu sastādīšana enkurlaidumiem; pārsprieguma un zemēšanas iekārtu aizsardzības pasākumu izvēle; nepieciešamo materiālu un iekārtu specifikācijas sastādīšana; kopējo EPL kapitālieguldījumu noteikšana. Mehāniskais EPL vadu un troses aprēķins balstās uz pieļaujamo spriegumu metodi, izolatoru un armatūras aprēķins – uz sagraujošo slodžu metodi, balstu un pamatu aprēķins balstās uz pieļaujamo stāvokļu aprēķina metodi. Tomēr pirms EPL projektēšanas uzsākšanas pasūtītājam jāiesniedz projektētājam tehniskais uzdevums, uz kura pamata arī notiek projekta un tāmju dokumentācijas izstrāde. Katrā konkrētajā tehniskajā uzdevumā jābūt skaidri aprakstītām šādām niansēm: EPL garumam, to virzienam, ķēžu skaitam, paredzamajai slodzei (vai arī norāda vada šķērsgriezuma laukumu), balstu un troses, kā arī izolējošās armatūras tipam u.c. Projektējot GEL, svarīgi ievērot tādus datus kā klimatiskie apstākļi, atmosfēras piesārņotības pakāpe (lai noteiktu izmantojamo izolatoru skaitu un tipu), vēja slodze, apledojuma sienīgas biezums.

ET attīstības projektu saturs rāda, ka to sastāvā ietilpst ļoti plašs jautājumu loks, kuri jārisina ar sistemātiskas pieejas palīdzību. Te nepieciešams izskatīt elektrostaciju un a/st. elektriskās shēmas, risināt ar pārsprieguma aizsardzību saistītus jautājumus, izvēlēties energosistēmas aizsardzības un automātikas ierīces automātiskai vadībai un tās darbības režīma regulēšanai, ieskaitot visu spriegumu ET, kas ir ārkārtīgi apjomīgs uzdevums, kuru praktiski risina, sadalot daļās atsevišķu dažādu funkciju EPT projektēšanu, relejaizsardzību (RA), automātikas ierīces utt. Projektējot katru no šīm daļām, atsevišķas daļas tiek atainotas aptuveni, ņemot vērā tikai elementus, kuri ietekmē konkrēto daļu un kuriem tiek paredzēti tipveida risinājumi. Tālāk šie projektējot iegūtie risinājumi tiek precizēti un saskaņoti [145].

Lai kvalitatīvi, ekonomiski efektīvi un ātri izpildītu izvirzīto triju posmu pamatprasības, nepieciešams izmantot modernus datorprogrammu nodrošinājumus, kas paredz GEL kompleksu projektēšanu.

1.4.2. GEL projektēšanas rīki

Projektēšanas organizācijas, kuru rīcībā nav mūsdienīga datornodrošinājuma, nespēj efektīvi risināt pašreizējos uzdevumus, tādēļ šādu rīku izmantošana līdztekus projektēšanas ātruma paaugstināšanai dod iespēju optimizēt pieņemtos lēmumus konkrētiem projektēšanas

apstākļiem, kas mūsdienās projektēšanas organizāciju vidū ir retums. Pašlaik optimālā izvēle ir programmatūras komplekss *PLS-CADD*, ko izstrādājis ASV uzņēmums *Power Line Systems Inc.* [125, 104], kā arī var minēt programmu kompleksu *SAPR LEP*, kas paredzēts GEL ar spriegumu no 10 līdz 750 kV automatizētai projektēšanai [110].

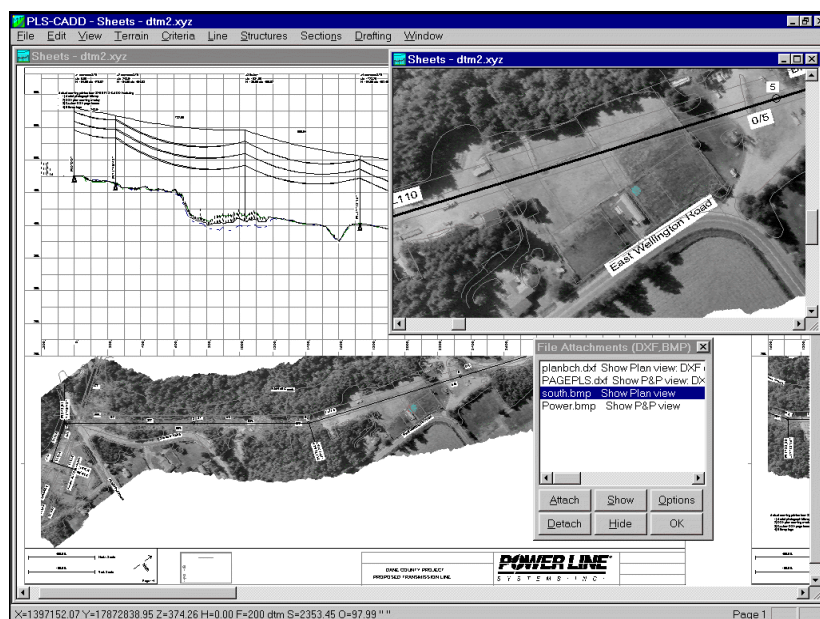
Nemot par pamatu iebūvētās trīsdimensiju ģeoinformācijas telpas izmantošanas principu, *PLS-CADD* izstrādātāji ir izveidojuši elastīguma ziņā praktiski neierobežotu instrumentu GEL apvidus modelēšanai un tās ģeotelpiskā modeļa izmantošanai, kas ļauj ar augstu precizitātes pakāpi pārnest dabā GEL trasi, balstu uzstādīšanas vietas, kā arī kontrolēt celtniecību saskaņā ar izstrādāto GEL projektu. Ļaujot projektētājam pilnā mērā izmantot tādu mūsdienīgu ģeodēziskās izpētes metožu priekšrocības kā lāzerskenēšana un aerofotogrāfija, *PLS-CADD* atbalsta ierasto inženierizpētes rezultātu izmantošanu, piemēram, profilu ar ģeoloģiju un topogrāfisko plānu izmantošanu. Programma ļauj savietot ar izveidoto apvidus modeli praktiski jebkākus grafiskus informācijas materiālus (planimetriskās vai ģeoloģiskās kartes), inženiertīklu shēmas vai citus datus, kā arī nodot ekspluatējošām un celtniecības organizācijām visus projekta grafiskos datus ar piesaisti pie uzdotās koordinātu sistēmas, tai skaitā formātā *Google Earth*.

Ekspluatējošās organizācijas iegūst līdzekli, ar kura palīdzību var pārbaudīt sniegtos projekta risinājumus – atbilstību normatīvajiem gabarītiem pie dažādām klimatiskajām iedarbēm kā starp GEL elementiem, tā arī līdz zemei un šķērsojamiem objektiem. Pietiek uzdot klimatiskos parametrus, un programma parāda katra GEL elementa uzvedību to iedarbībā, precīzi modelējot katra vadu izolējošā stiprinājuma, kā arī pašu vadu novirzi un identificējot problemātiskās vietas. *PLS-CADD* ne tikai piedāvā uzskatāmus attēlus, šī programma aptver visu GEL elementu mijiedarbības sarežģītību un atspoguļo katra elementa uzvedību tik precīzi, cik pilnīgā mērā tajā ievadīti attiecīgie parametri. GEL projekts, kas sniegts *PLS-CADD* atskaites izpildījumā, ļauj ieraudzīt visus tā sagatavošanas gaitā veiktos aprēķinus, ieviest izmaiņas GEL modelī, kuras rodas līnijas ekspluatācijas un remontu laikā; pēc būtības tas ir GEL elektroniskā pase (sk. 1.15. att.) [141].

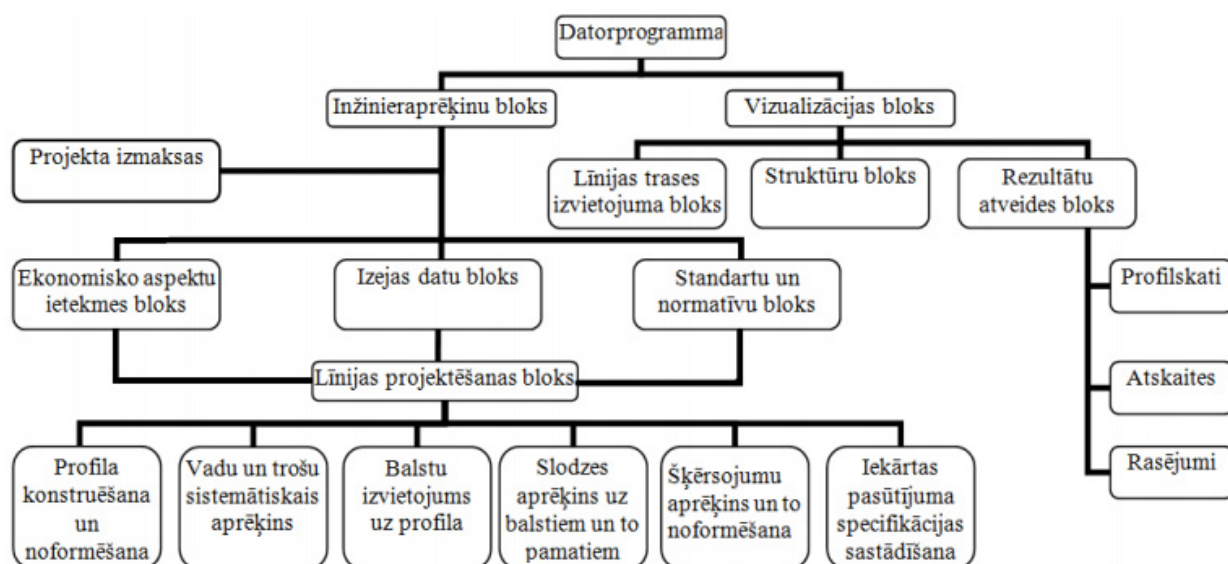
Vispārīgā gadījumā nosacītu datorprogrammu darbības struktūrshēmu, kas apkopo vairākām EPL projektēšanas programmām kopīgās iezīmes, var aplūkot 1.16. attēlā [25].

Projektētāji, izmantojot programmatūras kompleksu, iegūst iespēju ievērojami samazināt laiku, kāds nepieciešams GEL projektu risinājumu izstrādei un to pārbaudīšanai. Programma ir maksimāli adaptēta vairumam izmantojamo datu ievades un iegūto rezultātu

formātu. Programmas iespaidīgās grafiskās un aprēķinu iespējas būtiski atvieglo inženiera darbu un dod viņam iespēju koncentrēties tieši uz projekta risinājumu optimizāciju; tas aizstāj rutīnas darbu ar rasējumiem un ļauj pilnībā pāriet uz projekta dokumentāciju elektroniskā veidā, tajā pašā laikā formējot kompaktas un plaši pieejamas GEL galveno konstrukciju modeļu datubāzes. Galvenais, kas nepieciešams šādam sarežģītam un jaudīgam instrumentam, ir kvalificēts lietotājs.



1.15. att. PLS-CADD datorprogrammas interfeisa skats



1.16. att. GEL projektēšanas datorprogrammas pamatskice

1.5. Pastāvošās GEL optimizācijas pieejas

1.5.1. GEL optimizācijas uzdevuma formulējuma nepieciešamība

Energosistēmas ir viena no vissarežģītākajām sistēmām, ko izveidojusi cilvēce. Tās ietver simtiem un tūkstošiem elementu: katlus, turbīnas, ģeneratorus, transformatorus, elektropārvades līnijas u.c. Elementu funkcijas ir savstarpēji saistītas: procesi, kas norit sistēmas vienā daļā, ietekmē citu elementu darbību. Elementu savstarpējā atkarība diktē nepieciešamību ievērot to jau enerģijas objektu, piemēram, GEL, projektēšanas stadijā. Augsta vai superaugsta sprieguma pārvades līniju ietekme uz energosistēmas atlikušajām daļām ir būtiska, kā arī izmaiņas energosistēmā var ievērojami ietekmēt elektroenerģijas pārvades situāciju. Energoobjektu darba apstākļi nepārtraukti mainās laikā – parādās jauni patērētāji un elektrostacijas, elektroenerģijas patēriņš mainās un cenas aug. Dārgu energosistēmas elementu un komponentu darbmūžs ir ierobežots. Tas motivē nepieciešamību novērtēt apstākļus, kas var rasties diezgan tālā nākotnē. Protams, šos nosacījumus nevar prognozēt precīzi, tāpēc nepieciešams ievērot daudzus ietekmējošus faktorus un apstākļus. Šādu faktoru gadījuma un nenoteiktības raksturs rada sarežģītību dārgu energoobjektu (EPL) optimālā projektēšanas uzdevuma formulēšanā un risināšanā.

Ievērojams elektroenerģijas plūsmas pieaugums, kas radies būtisko energosistēmas struktūras izmaiņu dēļ, konkurējošais enerģijas tirgus, jaudīgu vēja elektrostaciju attīstība, kā arī tehnisko un likumdošanas ierobežojumu lielāka ietekmes attiecībā uz pieļaujamajām slodzes strāvām esošajos sadales un pārvades tīklos novērojams pēdējo desmit gadu laikā. Līdz ar to rodas nepieciešamība pēc jaunas GEL celtniecības, kas prasīs ievērojamas investīcijas, kā arī radīs ievērojamu ietekmi uz apkārtējo vidi.

Rezultātā par pašsaprotamu, dabisku un skaidru kļūst tādu mērķu izvirzīšana kā ieguldīto investīciju samazināšana, energosistēmas drošuma palielināšana, ietekmes samazināšana uz apkārtējo vidi GEL projektēšanas, būvniecības un ekspluatācijas laikā. Lai sasniegtu definētos mērķus, tika izstrādātas un īstenotas jaunas progresīvas EPT, tai skaitā GEL, projektēšanas tehnoloģijas viedo tīklu ietvaros [44]. Piemēram, ir pieejami dažāda tipa HTLS vadi, kas ir viens no iespējamajiem risinājumiem, uzlabojot un pilnveidojot jau esošās GEL [58, 68]. Tādējādi tradicionālā tipa vadu nomaiņa ar HTLS vadiem, izmantojot modernus izolatorus [80], optimizētas konstrukcijas balstus [112], zemējuma un zibensaizsardzības sistēmas [60], monitoringa un kontroles sistēmas, var sniegt vairākas tehniskās un ekonomiskās

priekšrocības. Turklāt pastāv arī spēcīgas mūsdienu programmatūras, kas vienkāršo GEL projektēšanu [104, 110].

1.5.2. GEL optimizācijas uzdevumā izmantojamās noteikšanas pieejas

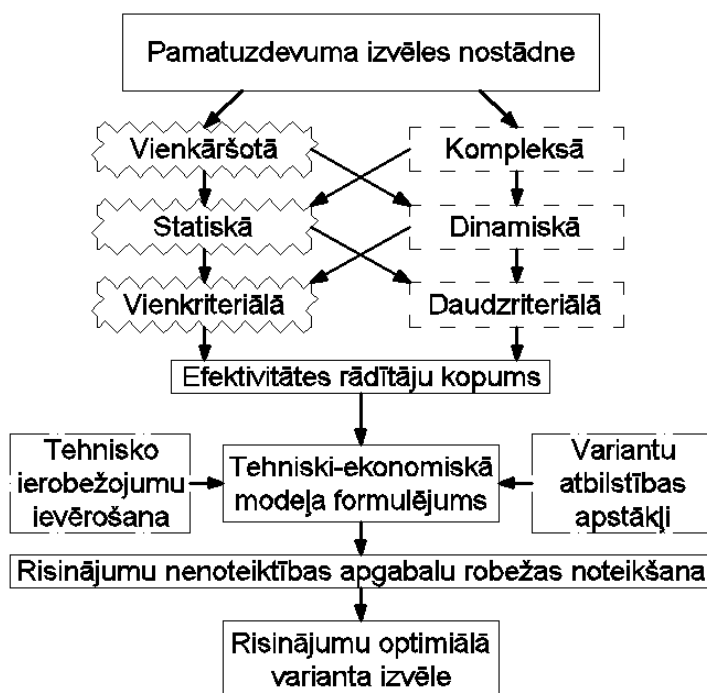
Vispārīgā gadījumā, lai atrisinātu konkrētu uzdevuma pamatnostādni elektroenerģijas pārvadē, izmanto dažādas metodes, pieejas un konstrukcijas, veidojot variantu kopu, un pēc tam salīdzina un izvēlas vislabāko no piedāvātajiem variantiem. Pamatuzdevuma atrisināšanas algoritms, kas ilustrēts 1.17. att., uzskatāmi atspoguļo EPL pamatuzdevuma optimālā variantā izvēli, kas balstās uz konkrētu efektivitātes rādītāju (ER) kopumu un tiem atbilstošo tehniski ekonomisko modeli (TEM), obligāti ievērojot visus tehniskos ierobežojumus un izskatāmo variantu salīdzināšanas apstākļu atbilstību. Parasti katrs ER atkarīgs no tehnisko un ekonomisko faktoru ietekmes, daļai no kuriem piemīt nenoteiktības raksturs. Tas nozīmē, ka nepieciešams noteikt pamatuzdevuma risinājumu nenoteiktības apgabalu robežas katram no ER vai to kopumam (aditivitātes vai multiplikatīvais). Šo apgabalu iekšienē arī nosaka optimālo risinājumu, pamatojoties uz lēmumu pieņemšanas personas (LPP) priekšstatu par visticamāko nenoteikto faktoru kombinācijām. Visai šai procedūrai piemīt pamatuzdevuma izvēles nostādne (formulējums). Kā redzams 1.17. att., pastāv trīs kategorijas iespējamai pamatuzdevuma nostādnei [130]:

- 1) attiecībā pret elementu optimizēto kopumu („vienkāršotā” vai „kompleksā”);
- 2) attiecībā pret laika faktoru ievērošanu („statiskā” vai „dinamiskā”);
- 3) attiecībā pret ER skaitu un to atbilstošajiem kritērijiem („vienkriteriālā” vai „multikriteriālā”).

Pamatuzdevuma nostādnes izvēle ir nopietns solis, jo rezultātā tas nosaka TEM (pamatuzdevuma matemātiskās nostādnes sarežģītības pakāpi), to analītiskā risinājuma iespējamību vai neiespējamību, atbilstošā matemātiskā aparāta izvēli un risinājumu darbietilpību. Piemēram, pamatuzdevuma nostādni var formulēt divējādi, pirmkārt, kā vienkāršu (orientācija uz vienu vienīgu elementu, neievērojot saistošus elementus), statistisku (neievērojot laika faktoru) un vienkriteriālu (pastāv vienīgais ER, piemēram, GEL celtniecības izmaksas un ER atbilstošs kritērijs – šo izmaksu minimums). Šeit TEM vairumā gadījumu iespējams atspoguļot nepārtrauktas diferencējamās funkcijas veidā un iegūt analītisko izteiksmi, lai noteiktu optimālos parametrus, kas atbilst optimizācijas mērķfunkcijas ekstrēmam. Otrkārt, pamatuzdevuma nostādni var formulēt sarežģīti kā kompleksu (piemēram, vienlaicīga vadu šķērsgriezumu, transformatoru jaudas, kondensatoru

baterijas izvēle), dinamisku (piemēram, ievērojot slodzes pieaugumu un kapitāla vērtības izmaiņas laikā) un multikriteriālu (vairāku ER izskatīšana). Lai atrisinātu šādu problēmas nostādni, galvenokārt izmanto dinamiskās programmēšanas un multikriteriālās analīzes metodes, kam pārsvarā raksturīgs darbietilpīgs skaitļošanas process. Šeit pamatuzdevuma nostādnes risinājumu apgrūtinā fakts, ka optimizācijas parametri ir diskrēti lielumi [117, 122, 130, 151].

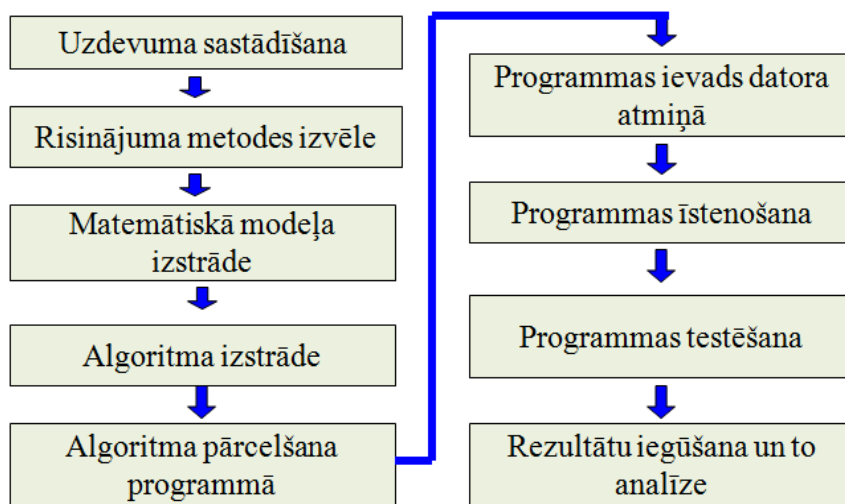
Rezultātā rodas jautājums, kas saistīts ar jaunizbūvētām GEL, kur efektivitātes novērtēšanas pamatuzdevums, kā arī kādas rādītāju sistēmas (vai kompleksa) izmantošana šī pamatuzdevuma risināšanai, iekļaujot investīcijas kā ekonomiskās efektivitātes rādītāju, kļūst par aktuālu un savlaicīgu jautājumu, it īpaši ņemot vērā faktu, ka mūsdienu apstākļos investīciju projektu efektivitātes novērtējuma metodoloģiskā bāze ievērojami atšķiras no pastāvošās plānveida ekonomikas [147]. Citiem vārdiem sakot, šodienas GEL optimizācijas pamatuzdevuma nostādnei jābūt kompleksai, dinamiskai un multikriteriālai, kas ir sarežģīts enerģētikas optimizācijas uzdevums.



1.17. att. Pamatuzdevuma risinājumu optimālā varianta izvēles shēma [130]

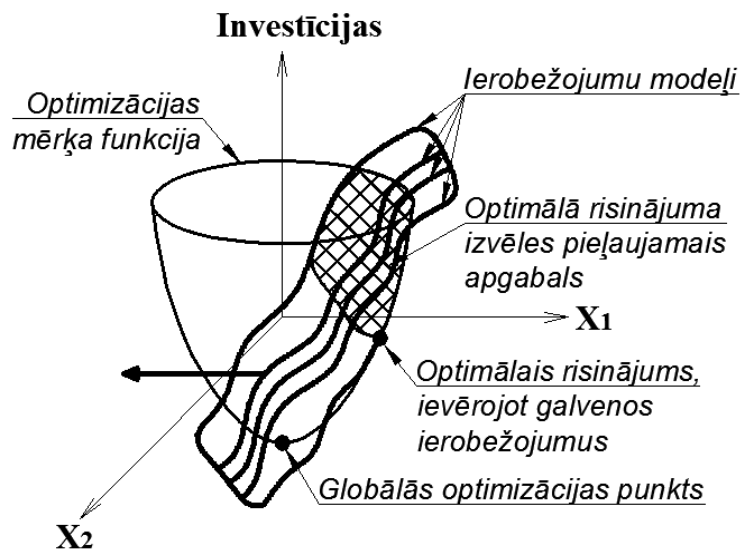
Lietderīgi piebilst, ka vienkāršs viendabīgo objektu, piemēram, GEL, skaita pieaugums norāda uz „ekstensīvu” attīstības ceļu, kas pēc savas būtības nav ekonomiski efektīvs optimizācijas pamatuzdevuma risinājums, jo investīcijas šādu objektu celtniecībā nesamazinās, bet gan paliek nemainīgas vai pat palielinās, jo pēdējo gadu laikā objektu

projektēšana no tipveida izstrādātiem projektiem pāriet pie individuālas pieejas katram projektam. Šādu tendenci energoobjektu realizācijā var novērtēt divējādi; no vienas puses, tas sarežģī GEL projektēšanu (nav vienotas tehnoloģiskās bāzes, tādā ziņā, ka katrs EPL elements, piemēram, balsts vai nepieciešamā lineārā armatūra nav tipveida rakstura, bet gan ar specializētu ievirzi), no otras puses, tā sniedz vairākas priekšrocības, bet galvenā no tām ir investēto izmaksu samazināšana, ievērojot noteiktus ierobežojumus – plašs optimizācijas uzdevumu darbības lauks (daudz uzdevumu ar vairākiem iespējamiem atrisināšanas variantiem). Savukārt, izvēloties „intensīvu” attīstības ceļu, objektu būvniecība paredzēta ar augstākiem kvantitatīviem raksturlielumiem, ko var panākt, izmantojot mūsdienu datorprogrammu nodrošinājumu, kas ievēro optimizācijas uzdevuma risinājuma etapus, lai izvēlētos vislabāko no visiem iespējamiem variantiem (sk. 1.18. att.).



1.18. att. Uzdevuma datorizētā risinājuma etapi

Optimizēta uzdevuma matemātiskais modelis ietver sevī trīs būtiskus pamatus: mērķa funkciju, ierobežojumus un robežas nosacījumus. Šādu uzdevuma nostādni var interpretēt 1.19. attēlā, kur skaidri redzams, ka pastāvošie ierobežojumi (galvenokārt tehniskie, ekonomiskie, ekoloģiskie un kā papildus ietekmējošie arī politiskie) ierobežo optimālā risinājuma izvēles pieļaujamo apgabalu. Kā redzams 1.19. att., investīcijas ir GEL projekta optimizācijas uzdevuma izvēles ekonomiskais pamatojums mūsdienu enerģētikas konkurējošo tirgu apstākļos.



1.19. att. GEL optimizācijas mērķa grafiskā ilustrācija

1.6. Investīciju projekta novērtēšanas metodes

GEL projektēšanā visplašāk izmanto metodes, kas balstās uz izmaksu un peļņas analīzi un NPV palielināšanu vai kapitālizmaksu samazināšanu, ievērojot vairākus ierobežojumus. Piemēram, literatūrā [51] tiek apskatīta GEL projektēšanas metode, kas aprēķina minimālās izmaksas; avots [66] atspoguļo attīstības metodiku, kas pēta pieprasītās peļņas pašreizējās vērtības sensitivitāti, lai panāktu projekta realizāciju pie minimālām izmaksām; avots [82] apraksta EPL optimizācijas metodes, kuras izmanto, lai izvēlētos piemērotu standarta vai optimizētas GEL projektēšanu; avotā [61] ir apskatīta optimālā projektēšanas metode, kas ievēro zibensaisardzības ietekmi, aprēķina un ierosina vispiemērotāko EPL izolācijas līmeni, balsta pamata pretestību, kā arī vidējo zibens troses piekāršanas augstumu; avotā [107] tiek izstrādāta EPL optimālās projektēšanas metode, kuras galvenais mērķis izvirza GEL kopējo ikgadējo izmaksu minimizāciju, ņemot vērā svarīgus tehniskus ierobežojumus; avotā [30] tiek ņemta vērā GEL būtiskā ietekme uz vidi, kas izraisa grūtības EPL trases izvēlē (jāievēro gan cilvēku, gan dzīvnieku un putnu pulcēšanās un darbības vietas izvietojums). Visu iepriekšminēto darbu pamatā ir deterministiskās metodoloģijas pieeja.

Darbs, kas balstās uz spēļu teorijas kritērijiem un pārvades elektrotīkla attīstības stohastiskās pieejas izmantošanu, tiek piedāvāts avotā [97].

Pēc būtības, pirms tiek sākta projekta īstenošana, nepieciešams novērtēt projekta sagaidāmo ekonomisko efektivitāti, analizējot izmaksas un peļņu, kā arī ieguldīto investīciju

apjomu un to atmaksāšanās periodu, ievērojot vairākus ierobežojumus; tādējādi tiek noskaidrota projekta reāli iespējamā peļņa.

Energoobjektu, tostarp arī GEL, projektēšanai visplašāk izmanto šādas investīciju projekta novērtēšanas metodes [20, 81]:

- 1) Neto tagadnes vērtības (NPV) metode – izdevumu un ienākumu summas kārtējā vērtība visa projekta ekonomiskās dzīves laikā. NPV metode balstās uz naudas plūsmas diskontēšanu (diskonta likme ir kopējo ieguldījumu atdeves likme, kuru investors vēlētos saņemt) un raksturo ieguldītā kapitāla atdevi, ievērojot laika faktoru un ar izskatāmā projekta realizēšanu saistītos riskus. Salīdzinot dažādus alternatīvo projektu variantus, izvēlas projektu ar vislielāko iegūto NPV (projektu uzskata par izdevīgu, ja $NPV > 0$), kas nodrošina augstāku investīciju efektivitāti un labāku naudas līdzekļu izmantošanu;
- 2) Projekta peļņas norma jeb rentabilitātes indekss (PI), šajā gadījumā PI palīdz novērtēt investīciju projektus, kuri atšķiras ar izmaksu un ienākumu plūsmām. PI nosaka, zinot projektu investīciju apjomu un to naudas ieņēmumu NPV (izsaka procentos). Rezultātā optimālā projekta izvēle balstās uz rentabilitāti, kas ir viens no uzņēmuma darbības efektivitātes rādītājiem – jo lielākā rentabilitāte, jo augstāka investīciju atdeve;
- 3) Iekšējās peļņas (rentabilitātes) norma (IRR) – šī metode balstās uz diskonta likmes tāda maksimālā lieluma noteikšanu, pie kura projekti ir rentabli, kā arī vienlaicīgi norāda investora maksimālo atdevi no projekta. Citiem vārdiem sākot, izslēgšanas ceļā izvēlas attiecīgajam projektam pieņemamu diskonta likmi (ir mērķtiecīgi pēc iespējas palielināt intervālu), pie kuras $NPV=0$;
- 4) Modificētā rentabilitātes norma (MIRR) – šī metode novērš nopietnas projekta iekšējās peļņas normas nepilnības, kuras rodas, vairākkārt investējot projektā. Projekta papildu investīciju izmaksu diskontēšana ar drošu likviditātes likmi sniedz iespēju noteikt visu izmaksu summāro NPV, kuras lielums ļauj objektīvāk novērtēt projekta peļņu [21];
- 5) Projekta atmaksāšanās periods (PP); šeit projektu novērtē pēc investīciju atmaksāšanās laika (parasti gados), kurā ieguldītie līdzekļi tiks atgūti – jo mazāks atmaksāšanās laiks, jo efektīvāks projekts (ātrāka ieguldīto investīciju atgūšana). Tomēr jāatzīmē, ka šodienas sīvas tirgus konkurences dēļ šai metodei piemīt būtisks trūkums – tā neievēro laika faktoru, pieņemot, ka peļņas lielums praktiski nemainās vairāku gadu laikā. Rezultātā projekta realizācija tiek pakļauta riskam, neievērojot investīciju vērtības maiņu laikā (naudas vērtība var samazināties nākotnē; iespējama diskonta likmes izmaiņa).

Šajā darbā izvirzītā uzdevuma nostādnes ekonomiskajam pamatojumam, kas balstās uz vairāku GEL projektu izvēles piemēriem (sk. 4. nodaļu), tiks izmantota NPV metode, kas ievēro investīciju vērtības maiņu laikā un ir viena no visbiežāk izmantojamām un visvairāk piemērotām jebkuru investīciju projektu ekonomiskās efektivitātes novērtēšanas metodēm enerģētikā.

1.7. GEL režīmu vadības iespējas un algoritmi

Esošā ET caurlaides spēja laika gaitā pasliktinās, jo pieaug tīkla sazarotība un sarežģās tā konfigurācija (pārvadāmo jaudu ierobežo kritērijs $(n-1)$), kas pašlaik ir par iemeslu vienai no aktuālajām tīklu enerģētikas problēmām – esošo GEL caurlaides spējas nepietiekamībai. Gadījumos, kad avārijas atslēgšanās uzklājas remonta shēmai, jaudas plūsmu pārdales rezultātā var notikt un notiek nepieļaujama atsevišķu elektrotīklu elementu noslodzes palielināšanās un to pārslodze. Lai likvidētu elektrotīkla elementu, tostarp GEL, nepieļaujamu pārslodzi, paredzētas šādas GEL režīmu vadības iespējas:

- 1) ģenerējošo jaudu un GEL jaudas sadalījuma režīmu regulēšana;
- 2) patērētāju slodzes regulēšana;
- 3) elastīgu maiņstrāvas pārvades sistēmu, tā saukto FACTS, izmantošana;
- 4) jaunu, uz mikroprocesoru elementu bāzes balstītu automātikas ierīču izmantošana un GEL monitoringa sistēmu ieviešana.

Tālāk aplūkosim detalizētāk minēto GEL vadības režīmu raksturīgās īpatnības.

1.7.1. Ģenerējošo jaudu un GEL jaudu sadalījumu režīmu regulēšana

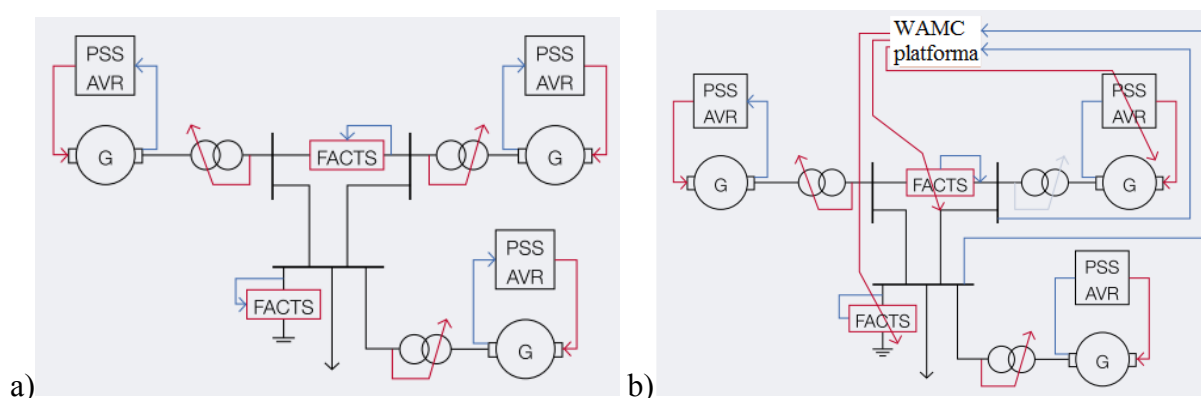
Sprieguma kvalitāte energosistēmā ir atkarīga no daudziem pretrunīgiem nosacījumiem. Jaudu patēriņš ir nepastāvīgs, tomēr tam piemīt krasi izteikts maksimums un minimums, gan gada, gan dienas laika diapazonā. Līdz ar to mainās arī jaudas ģenerācijas režīms un tās pārvade pa līnijām. GEL ir sarežģītas elektromagnētiskās sistēmas, kas ne tikai pārvada aktīvo jaudu, bet arī pašas ģenerē un patērē reaktīvo jaudu atkarībā no pārvades režīma, kas ārkārtīgi sarežģī elektroenerģētisko sistēmu vadību [118].

Līdz ar to jāpiemēro jaunas idejas un tehnoloģijas mūsdienu mainīgajos apstākļos. Tomēr pamatuzdevums paliek nemainīgs: jaudas plūsmas no piegādātāja pie patērētāja vadība un energosistēmas stabilitātes uzturēšana. Lai to nodrošinātu, nepieciešams uzturēt sprieguma un frekvences stabilitāti. Visiem ģeneratoriem, kas pieslēgti vienam maiņstrāvas tīklam, jābūt

sinhronizētiem savā starpā (fāžu stabilitāte), savukārt jaudas plūsmas virziens atbilst noteiktam „vienošanās ceļam” pie patērētāja [134].

Turpmākās vadības sistēmu attīstības tendences enerģētikā jaudas plūsmu vadības aspektā, kā arī frekvences, sprieguma un fāzes stabilitātes nodrošināšanas aspektā atspoguļo tās pašas vispārīgās izmaiņas: no vadības ar vietējiem mērījumiem uz koordinētu vadību, balstoties uz vietējiem mērījumiem un telemetriju. Lai izpildītu jaudas plūsmu vadības uzdevumus, saglabājot stabilu energosistēmas darbu, vadības algoritmos jāievēro tradicionāli automātiski sprieguma regulatori (AVR), energosistēmas stabilizatori (PSS) un transformatori, kā arī FACTS. Iegūtos algoritmus pēc tam izmanto sistēmās, kuras raksturo šādu paplašināto vadības metožu kombinācija [134]:

- 1) Vairākdimensiju vadība. Vadības iedarbes, kuras agrāk tradicionāli noteica, pamatojoties uz vienu lokālo atgriezeniskās saites signālu (sk. 1.20. att. a)), tagad tiks noteiktas, ņemot vērā kā vietējos, tā arī distances mērījumus. Tomēr nepieciešams izlemēt, kuri no pieejamajiem mērījumiem ir nozīmīgākie (sk. 1.20. att. b)) [13].
- 2) Hierarhiskā vadība. Atsevišķa parametra, piemēram, jaudas svārstību, vadība, kas koordinēta ar ierīču kopumu, lai vadības uzdevums, piemēram, nepieciešamā svārstību slāpēšana, tiktu veikts jebkuros apstākļos (sk. 1.20. att. a)).
- 3) Daudzkritēriju vadība. Vadības likumi atspoguļo vienas parādības ietekmi uz citu, piemēram, jaudas plūsmas izmaiņas izraisa vāji slāpētas vadu svārstības.
- 4) Adaptīvā vadība. Kontrolleri atklāj un ievēro faktisko (reālā laikā) energosistēmas stāvokli, tās raksturlielumus un izmaiņas struktūrā un fizikālajos parametros.



1.20. att. Energosistēmas vadība: a) tradicionāla, kas balstās uz vienu lokālo atgriezeniskās saites signālu; b) attīstības tendences metode, kas ietver sevī pāreju no atgriezeniskās saites, apstrādājot papildinformāciju, kas nonāk no telemetrijas kanāliem [134]

Lai realizētu minētās vadības metodes, nepieciešams, lai pastāvētu WAMC, kas veic pirmapstrādi visiem energosistēmā iegūtajiem mērījumiem. Pateicoties pilnveidotu algoritmu izmantošanai telemetrisko signālu apstrādē, energosistēmas stabilitāti iespējams novērtēt reālā laika režīmā – tādi parametri kā frekvence, elektromehānisko svārstību slāpēšana, līnijas termiskā pārslodze vai sprieguma nestabilitāte līnijās tiek kontrolēti dinamiski. Iegūto dinamisko informāciju var aplūkot parastā operatora stacijā. Pirmā WAMC platforma jau pieejama tirgū, taču, tā kā pašlaik tā nodrošina tikai monitoringu, tad lēmumu pieņemšanas gadījumos, kad vērojamas novirzes no normālā darba režīma, lēmumu pieņemšana jāveic operatoram vai citai atbildīgai personai. Jaunās izstrādes vērstas uz visas papildu informācijas nodošanu tieši uz ātrdarbīgiem energosistēmas kontrolleriem, kam savukārt jāpaver jaunas iespējas paplašinātai energosistēmu vadībai [134].

1.7.2. Patērētāju slodzes regulēšana

Viens no iespējamiem GEL pārslodzes novēršanas un likvidēšanas paņēmieniem ir patērētāju slodzes regulēšana, kas savukārt notiek, izmantojot un regulējot atbilstošus elektroenerģijas patēriņa režīmus.

Elektroenerģijas patēriņa režīms ir uzņēmuma un atsevišķu tā elektroenerģijas patērētāju elektrisko slodžu (patērējamās jaudas) maiņa laikā: diennakts laikā, nedēļas laikā, gada sezonās. Elektroenerģijas patēriņa režīmus apraksta ar atbilstošiem elektrisko slodžu grafikiem, un tos raksturo virkne rādītāju, piemēram, slodzes koeficients; gada (diennakts, mēneša) stundu skaits, kad izmanto patērētāja slodzes maksimumu; slodzes vienlaicīguma koeficients u.c. [23].

Galvenie elektroenerģijas patēriņa režīmu regulēšanas uzdevumi ir diennakts maksimumu pazemināšana un uzņēmumu slodzes grafiku izlīdzināšana, kas uzlabo ģeneratora darba apstākļus (it īpaši turbogeneratoriem), pilnīgāk izmantojot elektrostaciju uzstādīto jaudu [18].

Tomēr, ņemot vērā „viedo” tīklu (VT) adaptāciju un integrēšanu, rodas iespēja par 25-30% izlīdzināt slodzes grafikus sakarā ar elektrotīklu lieljaudas enerģijas uzkrājēju izmantošanu, kas ir īpaši aktuāli pīķa slodžu stundās, tādējādi ļaujot rezervēt energosistēmas jaudas nestandarta situāciju gadījumos. Uzkrājēju darbība balstīsies uz supravadītspējas, induktīvām tehnoloģijām (daudzās valstīs – Dienvidkorejā, Ķīnā, Austrālijā, Meksikā – supravadītāju tehnoloģiju izstrādes un ieviešanas programmas pieņemtas valsts līmenī).

Rezultātā energouzņēmumā samazinās pašreizējās izmaksas un kapitālieguldījumi, uzlabojas ģenerējošo jaudu balance, paaugstinās uzņēmuma konkurētspēja elektroenerģijas tirgū.

1.7.3. FACTS iekārtu izmantošana

VT GEL kļūst par aktīviem vadības elementiem – tās ir elastīgi vadāmas un spēj reaģēt uz EPT režīmiem un adaptēties atbilstoši tiem, panākot ievērojamu enerģijas zudumu samazinājumu tīklos. Patlaban līnijas aplūko tikai kā pasīvu elektroenerģijas un jaudas pārvades elementu, kas neatbilst „viedās” enerģētikas prasībām, kā arī nav atrisināts jautājums, kas saistīts ar GEL elastīgu un adaptīvu reaģēšanu uz EPT darbības izmaiņām, t.sk. slodzes izmaiņām. Neskatoties uz to, ka tagadējo enerģētikas situāciju raksturo strauja tehnoloģiskā progresa izaugsme (inovatīvas pieejas, metodes, tehnoloģijas), pastāv elastīgas GEL vadības un automātiskās paškontroles realizācijas iespēju problēmas. Viss tas prasa paaugstināt līniju un vadības elementu integrācijas pakāpi, izmantojot jaunus līniju konstruktīvos elementus, kuri adaptīvi reaģē uz ārējo apstākļu un pārvades apjomu izmaiņām [148].

FACTS var uzskatīt par VT „viedo līniju” apakšsistēmu – aktīvās iekārtas, kuras spēj elastīgi mainīt elektroenerģijas pārvades vai pārveidošanas raksturlielumus ar mērķi optimizēt tīkla režīmus uzreiz pēc vairākiem kritērijiem: GEL caurlaides spēja, tehnoloģisko zudumu apjoms, stabilitāte, jaudas plūsmu pārdale, elektroenerģijas kvalitāte.

Pastāv dažādas ieviešamās FACTS ierīces (sk. promocijas darba 1.3. apakšnodaļas 1.3.3.4 punktu) [128, 129, 149].

Rezultātā nepieciešams izstrādāt pilna mēroga programmu tehnoloģijas FACTS praktiskai izmantošanai EPT.

1.7.4. Jaunu automātikas ierīču izmantošana GEL un monitoringa sistēmu ieviešana

Mūsdienu programmu un tehniskais komplekss (PTK) tiek veidots uz mikroprocesoru kontrolleru bāzes ar augstu ātrdarbīgumu un pietiekamu atmiņas apjomu. Programmu un datu uzglabāšanai izmanto zibatmiņu, kas ļauj viegli mainīt programmu un nodrošināt ātru sistēmas atkārtotu palaidi atteices gadījumā. Telemehanizācijas izmantošana ET kompleksos ļauj apvienot atdalītus vai teritoriāli izklīdētus vadības objektus vienotā ražošanas kompleksā, kā arī saīsināt iekārtu dīkstāves. Īpašu nozīmi telemehānika iegūst sakarā ar

automatizēto vadības sistēmu (AVS) izveidi ST un EPT kompleksos. Pa telemehānikas kanāliem iegūto datu apstrāde ar elektroniskās skaitļošanas mašīnu (ESM) ļauj ievērojami uzlabot tehnoloģiskā procesa kontroli un vienkāršot vadību. Tāpēc patlaban jēdziena „telemehānika” vietā arvien biežāk izmanto tehnoloģiskā procesa automatizēto vadības sistēmu (TP AVS), piemēram, *SICAM PAS* [153], kā arī SCADA jēdzienu. AVS sistēmās izmanto devējus un pārveidotājus, kuri pārveido kontrolējamā objekta fizikālos parametrus (temperatūru, spiedienu, strāvu) normētos elektriskajos signālos, kā arī kontrollerus, kuri mēra signālus no devējiem un pārveido tos digitālā formā, nodrošinot datu lokālo apstrādi un pārvadot datus pa sakaru kanāliem uz centrālo ESM [152].

Augstfrekvences sakari ir sakaru iekārtu komplekss, kurā kā pārvades vidi izmanto GEL vadus un kabeļus. Augstfrekvences sakaru raiduztvērējus parasti uzstāda GEL galos a/st. teritorijā. Pamatā augstfrekvences sakarus izmanto elektrostaciju un a/st. vajadzībām: balss sakaru organizācijai (telefonsakari un dispečeru sakari), datu pārraidei (TP AVS, telemehānika, automatizētā elektroenerģijas kontroles un uzskaites sistēma (AEKUS)), relejaizsardzības un automātikas (RAA) un PA sistēmu darba organizācijai (aizsardzību paātrinājuma un bloķēšanas diskrēto komandu pārraide), kā arī sakariem ar operatīvajām izbraukuma brigādēm (izmantojot pārnēsājamus raiduztvērējus), GEL bojājuma vietas noteikšanai [144].

Šodien tradicionālās RA ar elektromehānisko elementu bāzi arvien aktīvāk nomaina pret mūsdienīgām digitālām ierīcēm, kurās apvieno sevī aizsardzības, automātikas, vadības un signalizācijas funkcijas. Digitālo terminālu izmantošana ļauj paaugstināt aizsardzību jutīgumu un ievērojami samazināt to nostrādes laiku, kas apvienojumā ar augstu drošuma pakāpi ļauj ievērojami samazināt kaitējumu, kāds rodas no elektroapgādes pārtraukumiem [144, 120, 123].

Viena no galvenajām mikroprocesoru aizsardzības releju priekšrocībām, kuras būtu jāatzīmē pirmām kārtām, ir veselas virknes funkciju un raksturlielumu (kā mērījumu un palāides orgānu, tā arī loģisko ķēžu) realizācijas iespējamība, kuras iegūt ierīcēs ar citu elementu bāzi ir vai nu neiespējami, vai arī samērā sarežģīti, kā arī iespēja atsevišķos gadījumos ievērojami vienkāršot konkrētu algoritmu realizāciju. Par labu piemēru var kalpot GEL vienfāzes automātiskās atkalieslēgšanas (VAAI) realizācija [153].

Elektroenerģijas pārvades pa GEL vadība ir organizatoriski tehnisku pasākumu komplekss, pašreizējā stāvokļa kontrole, defektu esamības diagnosticēšana, noteikto defektu

attīstības prognozēšana, atteižu plūsmas intensitātes parametru noteikšana, tehniskās apkopes, remonta, nodilušo un bojāto elementu nomaiņas izmaksu ievērošana. Tehniskā stāvokļa vadības sistēmas ieviešanas nepieciešams nosacījums ir pilnīgas un aktuālas informācijas esamība par GEL aktuālajiem parametriem, ko var panākt ar tehniskās diagnostikas līdzekļu, piemēram, GEL monitoringa sistēmu, palīdzību. Visperspektīvākā ir automatiskās diagnostikas sistēmu izveide, kuras ļauj kontrolēt iekārtu stāvokli to darbības laikā, neslēdzot tās remontam. Agrāk šādu sistēmu plašai ieviešanai traucēja virkne tehnisku ierobežojumu, kuras pārvarēt ir kļuvis iespējams, pateicoties mikroelektronikas tehnikas, tehniskās diagnostikas metožu un algoritmu attīstībai, kā arī lietojumprogrammatūras attīstībai [131].

Plašā mūsdienīgo mikroprocesoru sistēmu un sakaru kanālu ieviešana rada jaunas iespējas GEL diagnostiskā monitoringa sistēmu izveidei, kas ir visefektīvākais virziens augstsprieguma iekārtu apkopes organizācijā. No GEL monitoringa un operatīvās diagnostikas sistēmu izstrādes un ieviešanas virzieniem visinteresantākie ir šādi [52]:

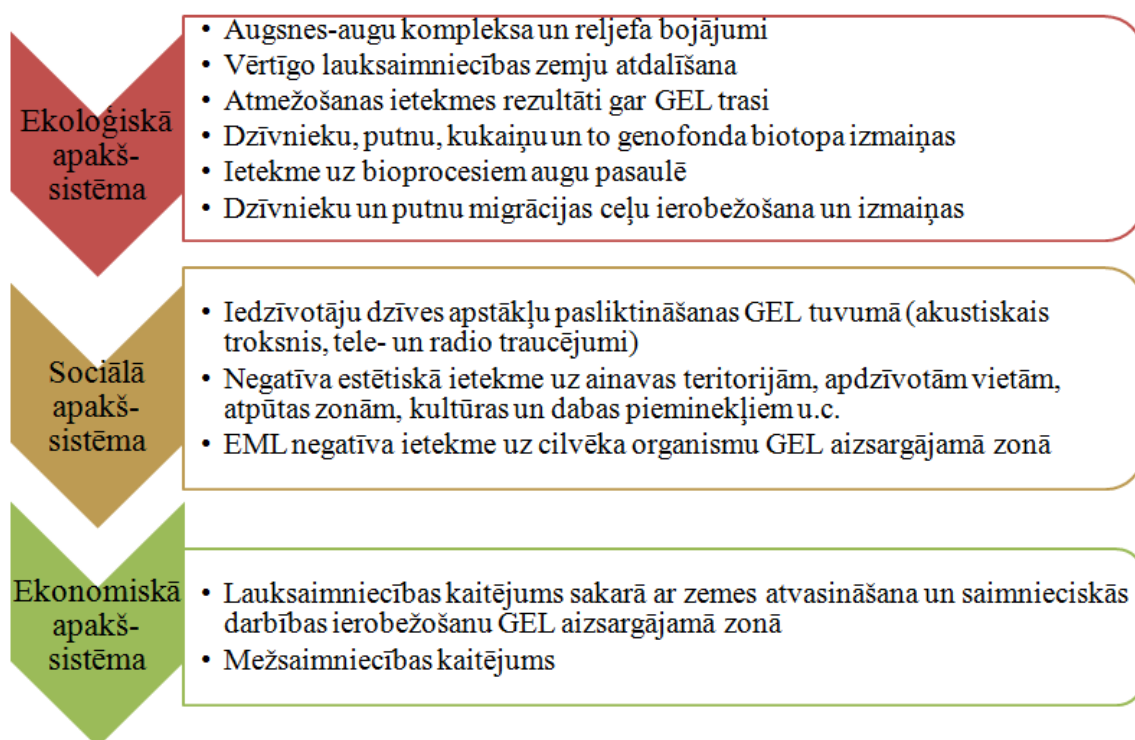
- 1) GEL caurlaides spējas paaugstināšana, izmantojot līniju vadu temperatūras monitoringa sistēmas;
- 2) Elektrolīniju vadu tehniskā stāvokļa operatīva kontrole, ko veic ar dažādām metodēm monitoringa režīmā;
- 3) Elektrolīniju piekarizolācijas tehniskā stāvokļa kontrole, izolācijas virsmas piesārņojuma kontrole, bojāto izolatoru meklēšana līnijā;
- 4) Tādu līniju noteikšana, kam ir vienfāzes zemesslēgums, un zemesslēguma vietas noteikšana.

VT iespējas, konkrēti, monitoringa un režīmu prognozēšanas un vadības iespējas, ļaus ievērojami paaugstināt elektroenerģētikas sistēmu pretavārijas vadības efektivitāti un adaptivitāti. VT projektu vērtība ir ne tikai valsts energosistēmas enerģētiskās un ekonomiskās efektivitātes paaugstināšanā, bet arī spējā pārspēt pierasto resursu attīstības ceļu un spert soli pretī valsts enerģētikas praktiskai modernizācijai, ieviešot a/st. standarta tehnoloģisko procesu AVS sistēmas, kurās izmanto OPGW digitalizētas informācijas pārraidei, tādā veidā paaugstinot elektroapgādes drošumu, izlīdzinot ET slodzes grafikus un ļaujot kontrolēt elektroenerģijas tranzīta pamatparametrus reāllaika režīmā (VT energoklasteru veidošana) [144].

1.8. Augstsprieguma elektrolīniju ietekme uz vidi

1.8.1. Vispārīgas ziņas

GEL kā elektroenerģētiskas sistēmas elementam ir tiešs kontakts un mijietekme ar vidi. Projektējot un būvējot GEL, nākas saskarties ar dažādām visraksturīgākajām ekoloģiskajām problēmām, piemēram, 1.21. attēlā atspoguļotas trīs galvenās apakšsistēmas [126]. Daļa norādīto iedarbju uz vidi ir kvantitatīvi novērtējamas un izsakāmas ekonomisku rādītāju veidā. Taču vairumu iedarbju uz biosfēru un sociālajām sistēmām novērtēt ir sarežģīti, bet dažkārt arī neiespējami.



1.21. att. GEL pamatietekmējošo apakšsistēmu definējums

1.8.2. Galvenie EPL vidi ietekmējošie faktori

GEL ietekme uz vidi ir ārkārtīgi daudzveidīga, tomēr galvenie specifiskie faktori šeit ir EML un akustiskais troksnis, kā arī GEL estētiskā iedarbība. Aplūkosim šos faktoros detalizētāk.

ML un EL iedarbību parasti aplūko atsevišķi. ML kaitīgā iedarbība uz dzīvajiem organismiem, pirmām kārtām uz cilvēku, izpaužas tikai pie ļoti augstām ML intensitātes vērtībām, ap 150 – 200 A/m, kas rodas līdz 1 – 1,5 m attālumā no GEL fāžu vadiem, un ir bīstama, veicot darbus zem sprieguma. Savukārt EL izraisa augsnes elementu polarizāciju un

strukturālu pārveidi, kā arī ietekmē augsnes veidošanās procesu. Galvenās problēmas augstsprieguma elektrolīnijām saistītas ar GEL radītā EL iedarbi, kuru nosaka pamatā GEL fāžu vadu lādiņi. Paaugstinoties GEL spriegumam, vadu skaitam fāzē un sadalītā vada ekvivalentajam rādiusam, fāzes vadu lādiņš strauji pieaug, piemēram, 750 kV līnijas fāzes lādiņš ir 5-6 reizes lielāks par 220 kV līnijas viena vada lādiņu, bet salīdzinājumā ar 1150 kV – 10-20 reizes, radot EL intensitāti zem GEL vadiem. Rezultātā cilvēka atrašanās spēcīgā EL kaitīgās sekas atkarīgas no EL intensitātes pakāpes un iedarbības ilguma. Turklāt EML arī attur zivis, veidojot to migrācijas ceļā elektromagnētiskus aizsprostus un traucējot nārstu virknei sīkāku un lielāku zivju sugu, kā arī ietekmē gājputnu migrāciju [154].

Esošie pašlaik pasaulē pastāvošie ražošanas un ārpusražošanas higiēniskie EL intensitātes un ML indukcijas normatīvi, kura frekvence ir 50 Hz, sniegti 3. pielikumā.

Kas attiecas uz akustisko troksni, tad to rada koronas izlāde uz vadiem. Vadus izvēlas tā, lai spriegums uz vada virsmas nepārsniegtu koronas izlādes sākotnējo spriegumu. Tomēr nelīdzenumi uz vada virsmas mehānisku bojājumu (atskabargas, skrambas) dēļ, piesārņojuma dēļ (smērvielas lāses, cietās daļiņas), nokrišņu dēļ (lietus, rasas lāses, sniegs utt.) izraisa vietēju EL intensitātes paaugstināšanos. Rezultātā uz GEL vadiem rodas koronas izlāde pie mazāka sprieguma nekā patstāvīgas izlādes spriegums tīriem, nebojātiem vadiem. Tādēļ GEL radīto troksni var dzirdēt arī labā laikā, taču īpaši tas pastiprinās lietus laikā.

Apvidos, kur ir augsts iedzīvotāju blīvums apvienojumā ar ekonomiskām un tehniskām problēmām, kas rodas, būvējot GEL, rodas problēmas, kas saistītas ar šo līniju estētisko iedarbību uz vidi. Šī iedarbība saistīta ar balstu izmēriem (augstumu), to arhitektonisko formu, visu līniju elementu krāsojumu. Lai uzlabotu GEL vizuāli estētisko uztveri, iesaka sekojošo: izvēlēties balstus, kas atbilst industriālās estētikas prasībām un pareizām arhitektoniskajām formām, veidot dabisku aizsegu (ekrānu) līniju elementiem, lai mazinātu to spīdēšanas efektu, kā arī izmantot divķēžu balstus vai dažāda augstuma balstus [87].

1.9. Secinājumi

1. Elektropārvades tīklu attīstība paredzēta gan starptautiskā, gan nacionālā mērogā jauno elektrisko savienojumu realizācijas (Estlink-2, NordBalt, LitPol, „Kurzemes loks”), atjaunojamo energoresursu lielās ietekmes, enerģijas tirgus liberalizācijas un jaunas atomelektrostacijas celtniecības rezultātā, kas būtiski palielinās Baltijas pārvades tīklu tranzīta jaudas plūsmas.

2. Lai veiksmīgi risinātu energobilances nodrošināšanas jautājumus un energosistēmas režīmu regulēšanu, no vienas puses, būs nepieciešams paplašināt esošā tīkla elektriskos savienojumus, būvējot jaunas GEL ar lielu caurlaides spēju, no otras puses, šo problēmu risināšanu būs iespējams realizēt, izstrādājot un ieviešot esošajā elektrotīklā jaunas tehnoloģijas.
3. Jauno tehnoloģiju integrēšana ļaus pielāgoties dinamiski operatīvai augstsprieguma elektrolīniju kontrolei un vadībai reāllaika režīmā, savlaicīgi izvērtējot GEL režīmu vadības iespējas un algoritmus.
4. GEL konstrukcijas un parametri formē to galvenos mehāniskos, termiskos un vides ietekmes ierobežojumus, kas ir tieši saistīti ar optimālā EPL celtniecības izmaksu risinājuma meklēšanu, izmantojot atbilstošu investīciju projekta novērtēšanas metodi.
5. Formulējot GEL optimizācijas uzdevumu, nepieciešams ievērot visus vidi ietekmējošos faktorus, it īpaši jāizvērtē EML ietekme, jo savlaicīgi izvērtēti balstu izvietojuma nosacījumi un to konstrukciju iespējas elektrolīnijas trasē sniegs ekonomiski pamatotas priekšrocības to praktiskajai realizācijai.
6. Lai kvalitatīvi, ekonomiski efektīvi un ātrdarbīgi izpildītu GEL projektēšanas uzdevuma izvirzītās pamatprasības, nepieciešams izmantot modernu datorprogrammu nodrošinājumu, kas paredz kompleksu GEL projektēšanu, ievērojot pastāvošās GEL optimizācijas pieejas.

2. AUGSTSPRIEGUMA LĪNIJU OPTIMIZĀCIJAS UZDEVUMA MATEMĀTISKAIS FORMULĒJUMS

2.1. Pamatpieejas uzdevuma nostādne

Šī darba pētījums attiecas uz EPL projektēšanas metodi, kas ir daļēji balstīta uz stohastiskās pieejas un spēļu teorijas kritērijiem, ko izmanto galīgā lēmuma pieņemšanai par energoobjektu realizāciju [43]. Šim nolūkam tika definēti šādi pieci posmi:

1. Pamatojoties uz aplūkojamā reģiona attīstības plānu analīzi, tika izstrādāti slodzes strāvas pieauguma scenāriji un novērtētas prasības attiecībā uz GEL pārvades jaudas izmaiņām;
2. Ievērojot mūsdienu programmatūras automātiskās iespējas elektrolīniju projektēšanā, kas ietver sevī ievērojamu tehnoloģisko un zināšanu bāzi, pastāv konkurētspējīgu GEL struktūras variantu un parametru izvēles dažādība. Turklāt šajā posmā nosaka arī visvairāk ietekmējošo ierobežojumu;
3. Tālāk tiek novērtēti kapitālieguldījumi un NPV vērtības visiem variantiem, gan ievērojot pastāvošos ierobežojumus, gan pārkāpjot vienu no tiem;
4. Tiek veidota konkurētspējīgu lēmumu dažādība, izmantojot konstruēto plakni – kapitālieguldījumu izmaksas un parametrs, kas raksturo visvairāk ietekmējošo ierobežojumu;
5. Tiek novērtēta apstākļu rašanās varbūtība, kas noved pie noteicošā ierobežojuma pārkāpšanas, to sekas un novēršanas pasākumi.

2.2. Varbūtiskie un nenoteiktie parametri un to ietekme

Lai formulētu GEL projektēšanas uzdevumus, ņemot vērā gadījuma un nenoteikto faktoru ietekmi, pieņemsim, ka [43]:

- Uzņēmums, kas ir GEL īpašnieks, cenšas minimizēt ieguldītās investīcijas I_C un palielināt savu peļņu R_{ti} (neto naudas plūsma, t.i., ieejošā naudas plūsma – izejošā naudas plūsma par katru gadu t_i plānošanas periodā T , $T=m \cdot t_i$);
- Uzņēmuma peļņa R_{ti} un ieguldītās investīcijas I_C ir atkarīgas no šī uzņēmuma izvēlētās GEL struktūras Σ_j un parametriem Π_j . Parametrus Π_j raksturo nepārtrauktu mainīgo kopums (laiduma garumi, balstu koordinātas, balstu tipi u.c.). Lai vienkāršotu optimālā risinājuma meklēšanas uzdevumu, nepārtrauktie mainīgie tiek aizvietoti ar diskrētu mainīgo lielumiem ar pietiekami mazu diskretizācijas soli precizitātes nodrošināšanai;

- Rezultātā, ņemot vērā to, ka nepārtraukti mainīgie tika aizvietoti ar diskrētiem un struktūras Σ_j arī tiek aprakstītas kā diskrētu mainīgo kopums (vadu skaits fāzē, tipveida balstu augstums un parametri, vadu šķērsgrīzums un to mehāniskie un elektriskie parametri u.c.), var konstatēt, ka EPL realizācijai ir iespējams izvēlēties jebkuru struktūras un parametru kombināciju. Katru šādu kombināciju sauc par alternatīvu. Pieņemsim, pirmkārt, ka N alternatīvas ir A_j , kur $j = 1, \dots, N$. Uzņēmuma struktūras un parametru brīvā izvēle ir ierobežota dažādu pastāvošo ierobežojumu dēļ. Otrkārt, S_j ir visu GEL pieļaujamo struktūru un parametru kopa un $s_j = \{\Sigma_j, \Pi_j\}$ kā izvēlēta struktūras un parametru kombinācija, $s_j \in S_j$. Pieļaujamās struktūras apgabala robežu nosaka pēc nevienādības, kas apraksta tehnisko ierobežojumu un likumdošanas noteikumus;
- GEL mērķa funkcijas ietekmē vide, kas raksturojama ar gadījuma un nenoteikto parametru kopu X_{ti} (GEL slodzes strāva, gaisa temperatūra, vēja ātrums un virziens, gaisa mitrums u.c.). Vispārīgā gadījumā X_{ti} mainās laikā. Mēs pieņemam, ka katra gada laikā t_i X_{ti} paliek nemainīgs.

2.3. Mērķa funkcijas un ierobežojumi

Sakarā ar gadījuma un nenoteikto parametru ietekmi arī peļņai piemīt nenoteikts raksturs. Šajā gadījumā var izmantot scenāriju pieeju kombinācijā ar iespējamām mainīgajiem, lai risinātu GEL plānošanas uzdevumu. Nenoteikta informācija tiks vienmēr modelēta pēc vairākiem scenārijiem, līdz ar to var apgalvot, ka katra scenārija SC_n ($n = 1, \dots, k$) peļņa R_{tij} ir varbūtības vērtība, kuru var izteikt ar šādas izteiksmes palīdzību [43]:

$$R_{tijn} = R_{tijn}(s_j, X_{tijn}) \quad (2.1)$$

Pieņemsim, ka sadalījuma funkcijas, kas ir izteiktas šādā veidā, var uzdot ar katru scenāriju SC_n un alternatīvas A_j kombināciju; tādā gadījumā:

$$F_{tijn} = F_{tijn}(R_{tijn}(s_j, X_{tijn}) | SC_n, A_j). \quad (2.2)$$

Ja ir zināma sadalījuma funkcija, tad sagaidāmo peļņas vērtību par katru gadu t_i , katrai scenārija SC_n un alternatīvas A_j kombinācijai var noteikt, izmantojot šādu vienādojumu:

$$E[R(s, X)] = \int_{\Omega} R(s, X) dF(R(s, X)), \quad (2.3)$$

kur Ω – integrācijas laukums, kuru ierobežo gadījuma un nenoteikto parametru X_{ti} esošais apgabals. Turklāt pieļaujamo parametru un struktūru S_j apgabala robežu limitē ierobežojumi:

$$FR(s_j, X_{ti}) > 0. \quad (2.4)$$

Vienādojumā (2.3) tika izmantots Lebega-Stiltjesa integrālis [87].

Zinot sagaidāmās peļņas vērtību, var atrast NPV noteikšanas vienādojumu, kas kalpo kā galvenais optimizācijas kritērijs:

$$NPV = -I_c + \sum_{i=1}^m \frac{E(R)}{(1+I)t_i}, \quad (2.5)$$

kur I_c – ieguldītās investīcijas, kas ir funkcija no s_j ; I ir diskonta likme.

Tad GEL optimālās plānošanas uzdevumu var izteikt sekojoši:

$$s_{jn}^* = \arg \max \left(-I_c + \sum_{i=1}^m \frac{E(R)}{(1+I)t_i} \right), \quad (2.6)$$

kur $\arg$ nozīmē „arguments par” objekta maksimizāciju.

Izteiksmē (2.6) formulēto uzdevumu atrisinājums novedīs pie sistēmas struktūrām un parametriem s_{jn}^* , kas maksimizēs NPV plānošanas periodā T visiem izvēlētajiem scenārijiem SC_n un alternatīvām A_j . NPV vērtību var noteikt katrai scenāriju SC_n un alternatīvu A_j kombinācijai. Realizējot NPV maksimizācijas procesu, papildus izvēlas optimālā plānošanas uzdevuma paplašinājuma apgabalu s_{jn}^* ar mērķi noteikt alternatīvas un parametru vērtības, kas ir tuvu pieļaujamā apgabala robežai un aiz tās. Šādu parametru Pr_i pārskatīšana darbosies kā papildu optimizācijas kritērijs. Rezultātā, nosakot NPV un Pr_i vērtības visām scenāriju un alternatīvu kombinācijām, var iegūt matricu (sk. 2.1. tabulu). Pēc tam atliek izvēlēties vislabāko no alternatīvām. Šī pētījuma jēga ir tāda, ka dotajā alternatīvas kopā tiek aplūkoti arī tie risinājumi, kas noved pie visvairāk ietekmējošā ierobežojuma pārkāpšanas.

Kā redzams 2.1. tabulā, katra tās aile var saturēt Pareto kopu, ja indeksi Pr_i ievēro otru optimizācijas kritēriju; protams, jāņem vērā tas, ka vispārīgā gadījumā šo rādītāju skaits var būt liels. Vispārīgi galīgo lēmumu pieņemšana, kas balstās uz lēmumu kopu atspoguļotu 2.1. tabulā ir sarežģīts uzdevums, kuru atrisināšanai izmanto dažādas metodes [65]. Lietderīgi piebilst, ka nodarbojoties ar konkrētiem uzdevumiem, kas tiks ilustrēts turpmāk, rodas būtiskie vienkāršojumi.

2.1. tabula

NPV un ierobežojumu rādītāju Pr_i sagaidāmās vērtības

Alternatīvas	Scenārijs 1	...	Scenārijs k
A_1	$NPV_{11} Pr_{11}$	...	$NPV_{1k} Pr_{1k}$
.....		...	
A_N	$NPV_{N1} Pr_{N1}$	...	$NPV_{Nk} Pr_{Nk}$

Meklējot vislabāko GEL optimizācijas uzdevuma alternatīvu, jāņem vērā termiskie, mehāniskie, elektriskie un vides ierobežojumi. Projektējot EPL, jānodrošina uzstādītā maksimālā slodzes strāva, gabarīts līdz zemei un šķērsojamiem objektiem, kā arī EL un ML intensitāte. Sakarā ar to, ka liels optimizācijas parametru skaits ir diskrēts, var apgalvot, ka, lai atrisinātu izteiksmē (2.6) formulēto GEL optimizācijas uzdevumu, jāaprēķina investīcijas visām iespējamajām parametru kombinācijām s_j atbilstoši pieņemtajam ierobežojumu paplašinājuma apgabalam: $s_j \in S_j$. Parasti, ja kāds no esošajiem ierobežojumiem neizpildās, tad optimizācijas uzdevumā šādu alternatīvu neņem vērā, noraidot to. Savukārt šis pētījums ļauj izskatīt alternatīvas pat ar ierobežojumu pārkāpšanu, jo mūsdienās pastāvošo tehnisko iespēju, piemēram, viedo tīklu (VT), dažādu monitoringa sistēmu, HTLS vadu, attīstīšana un realizēšana sniedz papildu priekšrocības, lai tiktu apmierinātas izvirzīto ierobežojumu prasības. Tādējādi piedāvātā EPL optimizācijas uzdevuma atrisināšanas pieeja ļauj izmantot visvairāk ietekmējošā ierobežojuma pārkāpšanas iespēju, vienlaicīgi novērtējot šāda pārkāpuma rašanas varbūtību. Būtiskākie GEL ierobežojumi, kuri tika ievēroti pie GEL optimizācijas pamatuzdevuma nostādnes, ir aprakstīti 1.2. apakšnodaļas 1.2.2. punktā.

2.4. Scenāriju un Pareto pieeja

Šobrīd lielā mēroga enerģētikas investīciju projekti realizējas nenoteikto izejas datu apstākļos vairāku iemeslu dēļ (pasaules enerģētisko tirgu pakāpeniskā liberalizācija, VT globalizācijas tendences, atjaunojamo energoresursu ietekme uz elektroenerģijas cenas veidošanu, pasaules un valsts ekonomikas attīstības nepastāvība u.c.), kas rezultātā sarežģīt investīciju projektu pieņemšanas risinājumu procesu un stimulē tālāko investīciju risinājumu pieņemšanas metožu attīstību. Viena no metodēm, kas pašlaik aktīvi attīstās ir scenāriju analīzes metode, kas ietver sevī vairākus etapus: investīciju variantu veidošanu; scenāriju kopas veidošanu priekš izvēlēto investīciju variantiem; scenāriju analīzes metodes izvēli; izvēlēto variantu analīzi ar izvēlētas metodes palīdzību; vairāku variantu izvēli no jau izveidotās scenāriju kopas, kas visvairāk atbilst efektivitātes kritērijiem; efektīvāko investīciju variantu papildus analīzi, ievērojot sociālo, ekoloģisko un politisko nozīmību; investīciju variantu salīdzināšanu un galīgā lēmuma pieņemšanu, izvēloties visefektīvāko investīciju projektu (tiek analizēta investīciju projektu rentabilitāte, piemēram, izmantojot NPV metodi). Lietderīgi atzīmēt, ka veidojot scenāriju kopu, obligāti jāievēro, pirmkārt, mērķi, kas izvirzīti šai scenāriju kopai (peļņas maksimizācija, izmaksu minimizācija, vis ekoloģiskā varianta

izvēle u.c.), otrkārt, ierobežojumus, kas ietekmē šo scenāriju kopu (tehniski-ekonomiskie raksturlielumi), treškārt, jāizskata scenāriji, kuriem piemīt ļoti zema realizācijas varbūtība, ceturtkārt, scenāriju spēja būt par pašreizējās situācijas attīstības rezultātu (veidojot scenārijus, notikumi, kas nevar pastāvēt uz nejaušo notikumu ķēdes bāzes no tagadnes uz nākotni, nav jāizskata) [136].

Scenāriju pieeja ir universāls līdzeklis enerģētikas dažādu uzdevumu risināšanai, kurai piemīt savas raksturīgas īpatnības, piemēram, investīciju varianti veidojas uz galveno tehniski-ekonomisko mainīgo varbūtības variēšanas bāzes, kur katram mainīgam tiek uzdots to iespējamās vērtības intervāls (jo lielāks izskatīšanas horizonts, jo lielāks šis intervāls); šādu nenoteikto mainīgo skaits varbūt ļoti liels, rezultātā palielinās arī scenāriju skaits (scenāriju skaitu iespējams samazināt, izmantojot stohastisko pieeju un aprakstot nenoteiktus parametrus ar subjektīvām sadales funkcijām); sarežģīto valsts ekonomikas un enerģētikas saistību dēļ rodas nepieciešamība izmantot scenāriju veidošanas kompleksus modeļus; pastāv būtiskas metodiskas problēmas investīciju projekta galīgo lēmumu pieņemšanā (kā iespējamo šīs problēmas risinājumu var izmantot spēļu teorijas kritērijus, kā arī Pareto pieeju, kas tālāk tiks izskatītas un piemērotas šī darba GEL optimizācijas uzdevuma nostādnes risināšanai).

Jaunās GEL būvniecības nepieciešamību pamato aplūkojamā ģeogrāfiskā reģiona ekonomiskās attīstības prognozes, galvenokārt tas attiecas uz jaunām prognozējamām slodzēm vai esošo slodžu pieaugumu; jauniem ģenerācijas avotiem; nespēju sniegt drošu un kvalitatīvu elektroenerģijas pieprasījumu, izmantojot pastāvošos ET. Sakarā ar pozicionēto nenoteiktības ietekmi jāreķinās ar vairākiem scenārijiem, piemēram, attiecībā uz slodzes pieaugumu. Pēc energosistēmas attīstības scenāriju izvēles tiek izskatītas vairākas alternatīvas ar mērķi izvēlēties optimizācijas parametrus S_j (sk. 2.3. apakšnodaļu)

Par GEL optimizācijas parametriem var tikt izvēlēts līnijas nominālais spriegums, vada mehāniskie un elektriskie raksturlielumi (vada diametrs, šķērsgriezums, lineārās izplešanās koeficients, elastības modulis; vada pieļaujamā temperatūra un slodzes strāva; vada īpatnējā, lineārā un destruktīvā slodze), vadu marka, to skaits fāzē; balstu tips, to ģeometrija, augstums, pieļaujamie vēja, svara un gabarīta laidumi; izolatoru tips; vibroslāpētāju tips; zibensaizsardzības troses un optisko šķiedru kabeļa (OPGW) marka; zemēšanas un zibensaizsardzības sistēmas, GEL optimālā trase. Tādējādi, lai sasniegtu labāko GEL tehnisko un ekonomisko projektēšanas risinājumu, jāievēro liels optimizācijas mainīgo skaits. Kā jau

iepriekš minēts, GEL darbību ietekmē apkārtējās vides apstākļi, kas raksturojami ar gadījuma un nenoteikto parametru X_{ti} kopu.

Lai vienkāršotu sarežģīto peļņas novērtēšanas uzdevumu liela scenāriju un to alternatīvu kombināciju skaitam, kā arī daudzu optimizācijas mainīgo izvēli, tiek formulēts un atrisināts konkurētspējīgo variantu ierobežotā skaita filtrēšanas uzdevums, noraidot acīmredzami dārgus vai tehniski nepamatotus variantus. Vēl nesen izvirzītā uzdevuma atrisināšanai izmantoja uzkrātās pieredzes bāzi, kas atspoguļojās dažādos vadlīniju dokumentos, kuros bija sniegti standarta sadarbības risinājumu un noteikumu apraksti. Pēdējos gadu desmitos situācija ir mainījusies spēcīgu programmatūras rīku ieviešanas un izmantošanas rezultātā, piemēram, [104, 110], kas dod iespēju veidot ievērojami mazāku izejas konkurētspējīgo alternatīvu kopu. Tad pastāv problēma, kas saistīta ar efektivitātes novērtēšanu un tehnisko un likumdošanas ierobežojumu piemērotību katrai alternatīvai katrā scenārijā.

Vairāku konkurētspējīgu variantu papildu atmešanu var panākt, izmantojot vienkāršoto GEL optimizācijas uzdevuma formu, kuru var definēt šādi:

$$S_{ij} \approx \arg \min I_C, \quad (2.7)$$

Rezultātā, izmantojot vienkāršotu problēmas formulējumu, kas sniegts (2.7) formulā, uzreiz var noraidīt acīmredzami nekonkurētspējīgos GEL projekta variantus. Jāņem vērā tas, ka problēmas formulējums (2.7) izteiksmē neņem vērā daudzus svarīgus faktorus, piemēram, līnijas jaudas zudumus, un to iespējams īstenot tikai izteiksmes (2.6) izmantošanas gadījumā tālākai izskatīšanai paredzēto variantu skaitu samazināšanas nolūkā.

Optimalitātes metode pēc Pareto (Pareto pieeja) ir viens no visveiksmīgākajam daudzkritēriju optimizācijas uzdevumu atrisināšanas metodēm. To princips noved uzdevuma nostādni pie efektīvo plānu kopas meklēšanas, pieņemot, ka, ja kāda rādītāja (kritērija) uzlabošana prasīs pasliktināt vismaz vienu no pārējiem rādītājiem (kritērijiem), tad optimums ir sasniegts. Citos gadījumos, vektoriālās optimizācijas uzdevumu noved pie spēļu teorijas uzdevuma, kurā spēlētāji ir apakšsistēmas ar atšķirīgajiem mērķiem un kritērijiem [137]. Pareto risinājuma kopu izmanto gadījumos, kad daudzkritēriju uzdevumos dažādi kritēriji nav salīdzināmi [143]. Piemēram, šajā darbā Pareto risinājumu kopas plakne konstruēta uz divu pretrunīgu kritēriju bāzes – investīcijas un EL intensitāte, ļaujot pieņemt galīgo lēmumu konkrēta uzdevuma atrisināšanai – izvēlēties visefektīvāko (rentablo) GEL projektēšanas investīciju projektu (sk. promocijas darba 4. nodaļu) [43].

2.5. Optimizācijas uzdevuma atrisināšanas algoritms un metode

Jaunas EPL būvniecībai ir šādi galvenie mērķi: savienot jaunu ģenerācijas un resursu zonu ET (pastāv atjaunojamo resursu, fosilā kurināmā, hidroenerģijas un kodolenerģijas integrācija); uzlabot EPT drošumu (ekonomiskie un pārslodzes iemesli); kontrolēt elektroenerģijas nepiegādāšanas risku, nodrošinot piekļuvi papildu enerģijas ģenerācijas avotiem; paaugstināt EPL darbības efektivitāti, samazinot līnijas jaudas zudumus; padarīt vairumtirdzniecības tirgu konkurētspējīgu un efektīvāku; samazināt tīkla noslodzes, veidojot jaunus jaudas mezglus un koridorus [108]. Ņemot vērā iepriekšminēto iemeslu nozīmīgumu, optimizācijas uzdevuma atrisināšanas algoritmu var uzrādīt blokshēmas veidā (sk. 2.1. att.).

NPV aprēķināšana ir sarežģīts un ļoti laikietilpīgs uzdevums, jo pastāv grūtības, kuras nosaka šādi galvenie faktori:

- jāņem vērā GEL elementu cena, kuru nosaka „eksperimentāli”, sadarbojoties ar iesaistītajām pusēm (kompensācija par zemes vienību, kur tiek izvietota GEL trase; vadu, balstu un līniju armatūras izmaksas; īpašie nosacījumi kredīta iegūšanai u.c.);
- nav vispāratzītas peļņas noteikšanas metodoloģijas, kuru jāievēro, aprēķinot GEL celtniecības izmaksas.

Šajā pētījumā pieņemsim šādas hipotēzes:

- GEL celtniecību nosaka ET attīstības nepieciešamība, kas paredz nodrošināt plānoto elektroenerģijas patēriņa pieaugumu un jaudas tranzītu;
- aplūkojamais GEL projekts tiek realizēts, dibinot koalīciju, kas sastāv no diviem uzņēmumiem: esošā EPT īpašnieka (C1) un jaunās GEL īpašnieka (C2);
- jaunās GEL celtniecība ļauj EPT gūt papildu ikgadējo peļņu, kas vienāda ar enerģijas tranzīta vidējo izmaksu normalizētajiem procentiem (parasti 7-12 % [78]);
- šajā gadījumā kopējās papildu peļņas sadalījums (R_{ad}) un katra uzņēmuma papildu peļņa (R_{C1}) un (R_{C2}) balstās uz Šeplija vērtības izmantošanu, kas divu spēlētāju gadījumā ir vienkāršs uzdevums [116]:

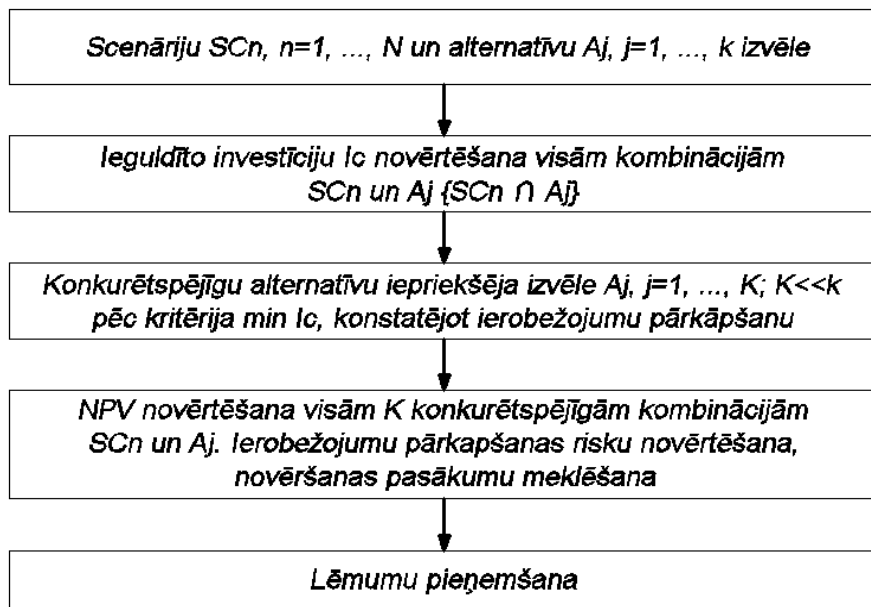
$$R_{C1} = R_{C2} = \frac{R_{ad}}{2} \quad (2.8)$$

Šeit pieņemam, ka EPT papildu peļņa tiek sadalīta starp jau esošo tīklu un jaunuzcelto GEL līdzvērtīgā proporcijā, un tad iegūstam ikgadējās peļņas apjomu:

$$R_{inc} = \left(\frac{I_l}{I_s} \right) \frac{R_{ad}}{2}, \quad (2.9)$$

$$\text{kur } R_{ad} = \beta(E_{an} + E_{antr}), \quad (2.10)$$

kur I_S – EPT ikgadējās investīcijas; I_l – GEL celtniecības investīcijas; E_{an} – elektroenerģijas patēriņa ikgadējais pieaugums; E_{antr} – elektroenerģijas tranzīta pieaugums; β – enerģijas izmaksu likme.



2.1. att. Optimizācijas uzdevuma atrisināšanas algoritma blokshēma

2.6. Koalīciju dibināšana un Šeplija sadalījums

2.6.1. Spēļu teorijas pieeja GEL plānošanas uzdevumos

Mūsdienas enerģētikas tendences tieksme pēc energoapgādes efektivitātes un drošuma paaugstināšanas, kā arī enerģijas ražošanas ietekmes samazināšanas uz apkārtējo vidi izraisīja enerģētisko sistēmu restrukturizācijas procesu (konkurējošo tirgus apstākļi). Rezultātā, uzņēmumi-monopolisti, kas nodrošināja elektroenerģijas piegādi tika aizstāti ar vairākiem neatkarīgiem (zināmā mērā) uzņēmumiem, cenšoties palielināt savu peļņu un konkurētspēju – enerģijas tirgus veidošana. Tādējādi, energosistēmas attīstības plānošanas uzdevums būtiski izmainījās, formulējot peļņas maksimizācijas vai izmaksu minimizācijas uzdevumus (stratēģisks uzdevums – ieguldīto investīciju samazināšana). Pieņemot, ka uzņēmumu peļņu vai izmaksas var aprēķināt, mēs koncentrēsimies uz vislabākā iespējama lēmuma pieņemšanas uzdevumu. Šajā procesā, jāņem vērā tas, ka uzņēmumu lēmumi, kas skar energosistēmas elementu struktūras un parametru izvēli ietekme citu uzņēmumu lēmumu efektivitāti. Tā kā vispārējā gadījumā katra uzņēmuma pieņemtie lēmumi ir konfidenciali, rodas nepieciešamība ieviest optimizācijas mainīgus, kuram piemīt nenoteiktības raksturs. Lai izvairītos no grūtībām,

kas varētu rasties šajā procesā, izmanto scenāriju pieeju (sk. 2.4. apakšnodaļu), saskaņā ar kuru tiek meklētās visas iespējamās dotā uzņēmuma stratēģijas (plāni) pie visām iespējamām konkurējošo uzņēmumu stratēģijām, rezultātā mainīgie, kas apraksta stratēģijas, zaudē nenoteiktu raksturu. Tomēr šī vienkāršošana tiek sasniegta, pateicoties tam, ka galīgo lēmumu pieņemšanas process kļūst sarežģītāks. Scenāriju pieejas izmantošanas rezultātā tiek iegūta lēmumu kopa, kas atbilst visu iespējamo scenāriju kombinācijām. Parasti scenāriju pieeju izmanto mainīgajiem, kas raksturo spēlētāju rīcību un energosistēmas statusu tālā nākotnē (elektroenerģijas cenas, patēriņa līmenis, u.c.).

Risinot uzdevumus nenoteiktības apstākļos, galīgo lēmumu pieņemšanai izmanto lēmumu un spēļu teorijas metodes un kritērijus [91, 94], piemēram, minimaksa kritērijs (Valda kritērijs), minimina kritērijs, pesimisma-optimisma (Gurvica) kritērijs, vidējo izmaksu minimuma (Laplasa-Bajesa) kritērijs, Sevidža kritērijs [22, 157]. Kritēriju un metožu izvēle ir atkarīga no pieejamas informācijas rakstura. Energosistēmas plānošanas uzdevumos ir iespējami divi pamatgadījumi [16, 92]:

- 1) nav informācijas par konkurējošo uzņēmumu lēmumu pieņemšanas apstākļiem. Šajā gadījumā atkarībā no LPP subjektīvas personīgas izvēles, jāizmanto viens no iepriekš minētajiem kritērijiem;
- 2) pieejama pilnīgā informācija par katra uzņēmuma lēmumu pieņemšanas rezultātiem un iespēju pieņemt hipotēzi, kas pamatos pieņemto lēmumu racionalitāti un maksimālās peļņas iegūšanu. Šeit nenoteiktības raksturs mainās ievērojami, ko var izmantot, lai pieņemtu labākus lēmumus, un, līdz ar to palielināt peļņu.

Šajā darbā tiks apskatīts otrais gadījums, kad pieņem papildus nosacījumu, ka konkurējošie uzņēmumi var veidot koalīcijas ar galveno mērķi iegūt papildus peļņu.

Tātad definēsim energoapgādes attīstības plānošanas uzdevumu statisko spēļu formā ar pilnīgu informāciju [67]; tādā gadījumā spēle klasiskā formā atspoguļojama šādi:

$$\{I, S = \prod_i \{S_i\} \mid i \in I, R = \{R_1, R_2, \dots, R_n\}\} \quad (2.11)$$

kur I ir spēlētāju kopums, $\{S = \prod_i \{S_i\} \mid i \in I$ ir visu situāciju kombināciju kopums un R ir katra spēlētāja peļņas kopums pie visām tā stratēģijām un pie katras konkurentu stratēģiju kombinācijas.

Pieņemsim, pirmkārt, ka spēlētāju (uzņēmumu) sastāvs un skaits ir zināms, otrkārt, ka katrs spēlētājs zina visu dalībnieku peļņu jebkurā struktūras un parametru kombinācijā. Tas nepieciešams, lai atrisinātu šādas problēmas:

- ✓ racionalitātes un iespējamības noteikšana koalīciju organizēšanai starp spēlētājiem;
- ✓ metožu izvēle koalīciju organizēšanai un papildu peļņas sadalīšanai koalīcijas dalībnieku starpā.

Ja ņemta vērā koalīcijas dibināšanas iespēja, tad optimizācijas uzdevuma formulējumu pārveido vēlreiz. Sakarā ar nepieciešamību apsvērt ne tikai atsevišķo uzņēmumu stratēģijas, bet arī iespējamo dažādo koalīciju stratēģijas, uzdevuma dimensiju skaits ievērojami palielinās. Šī uzdevuma atrisināšanas rezultātā var iegūt katra uzņēmuma un to koalīciju suboptimālo plānu kopu pie dažādām iespējamo konkurentu plānu kombinācijām.

2.6.2. Peļņas sadale starp koalīcijas dalībniekiem – Šeplija vērtība

Kooperatīvas uzvedības gadījumā pastāv problēma, kas saistīta ar peļņas sadali koalīciju dalībnieku starpā. Vienkāršais risinājums būtu katram spēlētājam izmaksāt tā ieguldījumu c_i :

$$c_i = R(S \cup \{i\}) - R(S). \quad (2.12)$$

kur S – visas iespējamās koalīcijas ar i -tā spēlētāja piedalīšanos; $R(S)$ ir koalīcijas S peļņa, $R(S \cup \{i\})$ ir koalīcijas S peļņa, piedaloties dalībniekam i . Taču šāda pieeja nav anonīma, jo spēlētāju secība, kādā tie iesaistās koalīcijās, ietekmē katra spēlētāja saņemtās atlīdzības lielumu.

Spēļu teorijā Šeplija vērtība [96, 90] apraksta vienu no taisnīgas peļņas sadales pieejām, izvairoties no minētā trūkuma. Taisnīga sadale tiek nodrošināta, vienmērīgi izvēloties gadījuma sakārtojumu un izmaksājot katram no spēlētājiem tā sagaidāmās marginālās izmaksas saskaņā ar šo sakārtojumu. Tā kā spēlētāji var izveidot $n!$ iespējamus gadījuma sakārtojumus, varbūtība, ka kopa S ierindosies tieši pirms i -tā spēlētāja, ir šāda: $\frac{|S|!(n-1-|S|)!}{n!}$.

Tādēļ papildu atlīdzības vērtība, kādu iegūst i -tais spēlētājs, ir šāda [92]:

$$\phi_i = \sum_{i \notin S \subseteq N} \frac{|S|!(n-1-|S|)!}{n!} (R(S \cup \{i\}) - R(S)), \quad (2.13)$$

kur n ir kopējais spēlētāju skaits, $|S|$ ir kopas S lielums, summa ietver visas kopas N apakškopas S , kurās neietilpst i -tais spēlētājs.

Visvienkāršākajā gadījumā, kad spēlē un koalīcijā piedalās tikai divi spēlētāji, vienādojums (2.13) iegūst šādu formu [92]:

$$\phi_1 = \phi_2 = \frac{(R(S \cup \{i\}) - R(S))}{2}. \quad (2.14)$$

Tas nozīmē, ka šajā gadījumā papildu peļņu sadala uz pusēm.

2.7. Secinājumi

1. Jaunākās tendences energosistēmu attīstībā – elektroenerģijas tirgus ierobežojumu atcelšana (liberalizācija), jaunu tehnoloģiju izstrādāšana un ieviešana, kā arī sadales un atjaunojamo energoresursu ražošanas pieaugums – būtiski ietekmē pārvades elektrotīkla plānošanas un attīstības procesu.
2. Minētais fakts pieprasa jauno metožu nepieciešamību, kas ļaus atvieglot lēmumu pieņemšanas procesu GEL projektēšanas optimizācijas uzdevumos, rezultātā samazinot ieguldīto investīciju apjomu un jaudas zudumus, kā arī uzlabojot sistēmas drošumu un palielinot pārvadāmās elektroenerģijas kvalitāti.
3. GEL projektēšanas optimizācijas problēma ir daudzkritēriju optimizācijas uzdevums ar lielu stāvokļa un lēmumu mainīgo skaitu, kuru formulējot, jāņem vērā gadījuma un nenoteikto parametru iespējamā ietekme. Izvirzītās problēmas risinājums ir saistīts ar ievērojamām matemātikas, skaitļošanas un informācijas grūtībām.
4. Piedāvāta GEL daudzkritēriju optimizācijas metodes izmantošana, kas daļēji balstīta uz stohastisko pieeju un spēļu teorijas kritērijiem, ļaujot apsvērt pat alternatīvas ar visietekmējošā ierobežojuma pārkāpšanu, bet kuras, piemērojot dažus papildus tehniskus pasākumus, var būt ekonomiski visizdevīgākais GEL projektēšanas risinājums.
5. Metodes, kas balstās uz spēļu teoriju un to kritērijiem, var palīdzēt pieņemt pareizo lēmumu par elektroenerģijas pārvades un enerģijas piegādes avotu attīstību.
6. Kooperatīvās spēles teoriju piemēro dažādu enerģētisko uzdevumu risināšanai, kur neatkarīgi energouzņēmumi var iegūt augstu peļņu, veidojot veiksmīgu koalīciju ar citiem tirgus dalībniekiem.

3. IEROBEŽOJUMU MODEĻI, TO VERIFIKĀCIJA UN VADĪBA

3.1. GEL parametru eksperimentālā pārbaude

3.1.1. GEL termiskās monitoringa sistēmas galvenie parametri

GEL galvenos parametrus izmanto daudzu iekārtu algoritmos – kā RA un automātikas iekārtām, tā arī dažādām GEL monitoringa sistēmām, tādēļ līnijas pamatparametru pareiza noteikšana, izmantojot atbilstošu algoritmu, ir nepieciešama šādu iekārtu korektai funkcionēšanai.

Šajā darbā sintezētā GEL pieļaujamās slodzes strāvas monitoringa algoritma (no termiskā viedokļa) verifikācijai aplūkosim tādos galvenos parametrus kā vada temperatūra, slodzes strāva, vides temperatūra, vēja ātrums (vēja virziens).

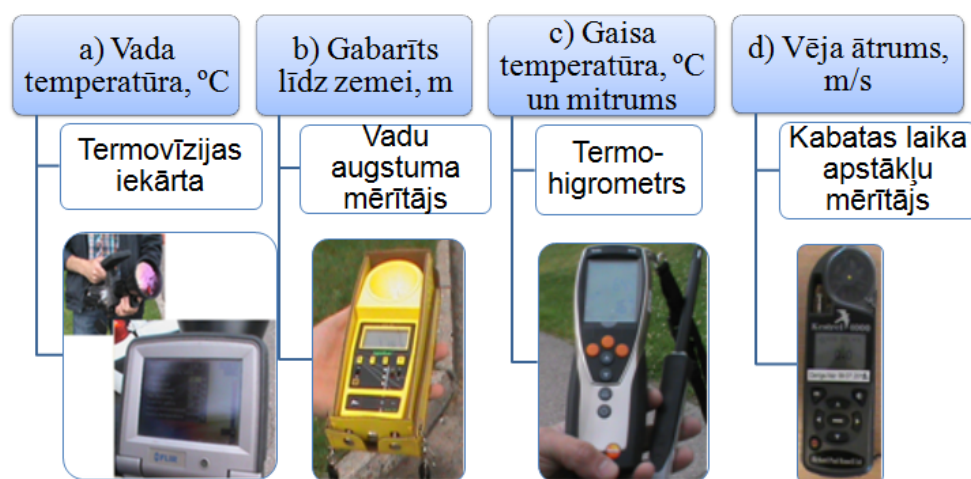
Klasiskās pieejas GEL galveno parametru noteikšanai parasti operē ar dažiem vidējiem datiem, uzskatot, ka tie ir nemainīgi, piemēram, GEL vadu ģeometriskais izvietojums vienam attiecībā pret otru, kā arī attiecībā pret zemi (gabarīts līdz zemei vai šķērsojamajiem objektiem), fāžu vadu fizikālās īpašības, grunts fizikālās īpašības (elektrovadītspēja), kā arī tipiski (vai par tādiem uzskatāmi) laika apstākļi (LA). Tomēr, izstrādājot GEL monitoringa sistēmu algoritmus, jāievēro fakts, ka iepriekšminētā informācija attiecībā uz vadu fizikālajām īpašībām un LA nosacījumiem ne vienmēr atbilst reālajai situācijai dabā, kas pašlaik ir samērā aktuāls jautājums it īpaši saistībā ar GEL, kas atrodas reģionos ar ievērojamām LA sezonālajām izmaiņām. Rezultātā RA un automātikas ierīces var funkcionēt nekorekti, piemēram, viltus vai liekas nostrādes veidā, vai arī, nepareizi aprēķinot attālumu līdz bojājuma vietai. Līdz ar to pēdējā laikā sākts pētīt, izstrādāt un izmantot dažādas GEL monitoringa sistēmas, tai skaitā arī GEL termiskās monitoringa sistēmas, kas ļauj atspoguļot kontrolējamās GEL reālo stāvokli.

Vieni no GEL termiskās monitoringa sistēmas pamatparametriem ir vada temperatūras un nokares noteikšana. Vada temperatūra atkarīga no dažādiem parametriem, piemēram, vada tipa fizikālajiem raksturlielumiem (vada diametrs, šķērsgriezuma laukums, masa, stiprība, termiskais pagarinājums, elektriskā pretestība), vadā plūstošās elektriskās strāvas un LA. Lai nodrošinātu EPL darbības drošumu un drošību, iepriekšminētie ietekmējošie faktori nosaka ierobežojumus attiecībā uz pieļaujamo vada temperatūru. Parasti gabarītus starp fāžu vadiem un citiem šķērsojamiem objektiem ierobežo jaudas pieaugums vairumam esošo GEL. Pieaugot līnijas slodzei, paaugstinās arī vada temperatūra, izraisot tā pagarināšanos.

Palielinātā pagarinājuma dēļ rodas papildu vada nokare, tādējādi samazinot gabarītu līdz citiem vadiem un šķērsojamiem objektiem. Nokares lielumu noteiktai strāvai tiešā veidā ietekmē LA, tostarp gaisa temperatūra un vēja ātrums [45]. Turklāt pastāv arī izolācijas plīsumu un bojājumu risks sakarā ar vada temperatūras paaugstināšanos, kā arī EML iedarbes pastiprināšanos sprieguma paaugstināšanās dēļ (samazinot drošos attālumus starp fāžu vadiem), rezultātā pārsniedzot pieļaujamās standartvērtības. Tādēļ vadu temperatūra jākontrolē, lai nepieļautu dažādas nevēlamas sekas, piemēram, pieļaujamās vada nokares pārsniegšanu. Turklāt precīza vadu temperatūras noteikšana ļauj korekti noteikt jaudas zudumus, kā arī adekvāti novērtēt bojājumu atrašanās vietas līnijā.

Lai izmērītu nepieciešamos GEL parametrus – vada temperatūru, gaisa temperatūru, gaisa mitrumu un vēja ātrumu, šajā darbā izmantoja vienkāršotu GEL parametru mērīšanas iekārtu komplektu (speciālas monitoringa ierīces), kas parādīts 3.1. att.:

- Vadu temperatūra tika mērīta, izmantojot speciālo termovīzijas iekārtu, piemēram, *FLIR ThermoCAM P65* (sk. 3.1. att. a)) [64];
- Gabarīts līdz zemei – izmantojot vadu augstuma mērītāju (sk. 3.1. att. b);
- Gaisa temperatūra un mitrums – izmantojot termohigrometru, piemēram, *Testo 635-1* (sk. 3.1. att. c);
- Eksperimentāli vēja ātruma mērījumi – izmantojot kabatas laika apstākļu mērītāju, piemēram, *Kestrel 4000* (sk. 3.1. att. d)).



3.1. att. Izmantojamās monitoringa ierīces

Kā jau iepriekš minēts, viens no galvenajiem GEL termiskās monitoringa sistēmas parametriem ir vada temperatūra. Līdz ar to tika veikti vairāki vada temperatūras mērījumi dažādām Latvijas energosistēmas esošām GEL pie vietējiem LA; mērījumu rezultāti atspoguļoti gan grafiskā, gan tabulas veidā.

3.1.2. Esošo GEL galveno parametru mērījumu rezultāti

3.1.2.1. GEL LNr. 600

Eksperimentālie mērījumi tika veikti trim pamatgadījumiem konkrētai GEL LNr. 600 (sk. 3.2. att. un 4. pielikumu), laidumam starp balstiem Nr. 1 un Nr. 2:

- 1) A – mērījumi veikti 2012. gada 28. jūnijā (sk. 3.3. att. a));
- 2) B – mērījumi veikti 2012. gada 13. jūnijā (sk. 3.3. att. b));
- 3) C – mērījumi veikti 2012. gada 27. decembrī (sk. 3.3. att. c)),

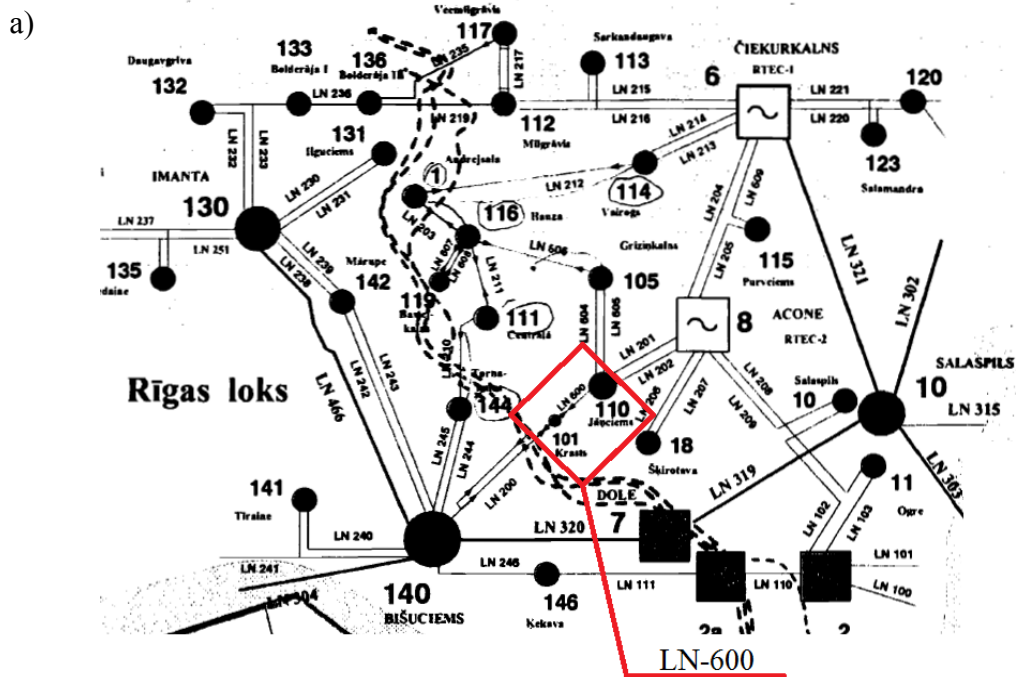
LA mērījumu eksperimentālie rezultāti (gaisa temperatūra, vēja ātrums, gaisa mitrums), termiskie (vadu temperatūra), kā arī elektriskie (slodzes strāva, spriegums) parametri parādīti 3.1. tabulā. Kā redzams tabulā, vadu temperatūras fāzēs ir zemākas salīdzinājumā ar gaisa temperatūrām, kas nav precīzi, taču ir pieļaujami, jo vada temperatūras mērierīces kļūda atrodas pieļaujamajās robežās – $\pm 2^{\circ}\text{C}$. Tāpēc līdz ar katru aplūkoto GEL gadījumu kā sākotnējo parametru termiskās strāvas aplēses metožu pārbaudīšanai (sk. 3.2. apakšnodaļu) pieņem visaugstāko vada temperatūru. EL un ML parametru validācijas atbilstība normatīviem jau iepriekš pārbaudīta.

3.1. tabula

GEL LNr. 600 mērījumu rezultāti

Parametri Iegūtie mērījumu dati	Gadījums A	Gadījums B	Gadījums C
	Balsti Nr. 1 – Nr. 2		
Spriegums, kV	115	115	117
Slodzes strāva, A	37	162	73
Slodzes aktīvā jauda, MW	2	31	7
Slodzes reaktīvā jauda, MVar	7	9	13
1. fāzes vadu temperatūra (AR01), $^{\circ}\text{C}$	17	25,6	3,9
2. fāzes vadu temperatūra (AR01), $^{\circ}\text{C}$	-	-	-
3. fāzes vadu temperatūra (AR01), $^{\circ}\text{C}$	14,7	25,8	3,5
Gaisa temperatūra (ta), $^{\circ}\text{C}$	17	21	3
Vēja ātrums, m/s	2-5	1-2	3-5
Vēja virziens	rietumu	rietumu	dienvidu
Laika apstākļi	daļēji mākoņains	saulains	mākoņains
Vadu tips	2xAS-240/32		
Pieļaujamā slodzes strāva gaisa temperatūrā:	1271 A	1271 A	
+ 20°C			
+ 5°C			1452 A
Līnijas noslodze, %	3	13	5

Vērts piebilst, ka korektai vada temperatūras mērījumu veikšanai ar infrasarkanu termogrāfiju iepriekš tika noteikts maksimāli pieļaujamais mērījumu attālums dotās GEL vadam, vadoties no termovizora *FLIR ThermoCAM P65* momentānā redzeslauka (IFOV; 1,3 mrad) [99]. Būtībā IFOV apzīmē minimālo nosakāmo lielumu (viena pikseļa lielums), kas palielinās līdz ar mērījuma attālumu, tādējādi mērījumu var uzskatīt par korektu, ja vada platums ietver vismaz 3 pikseļus.



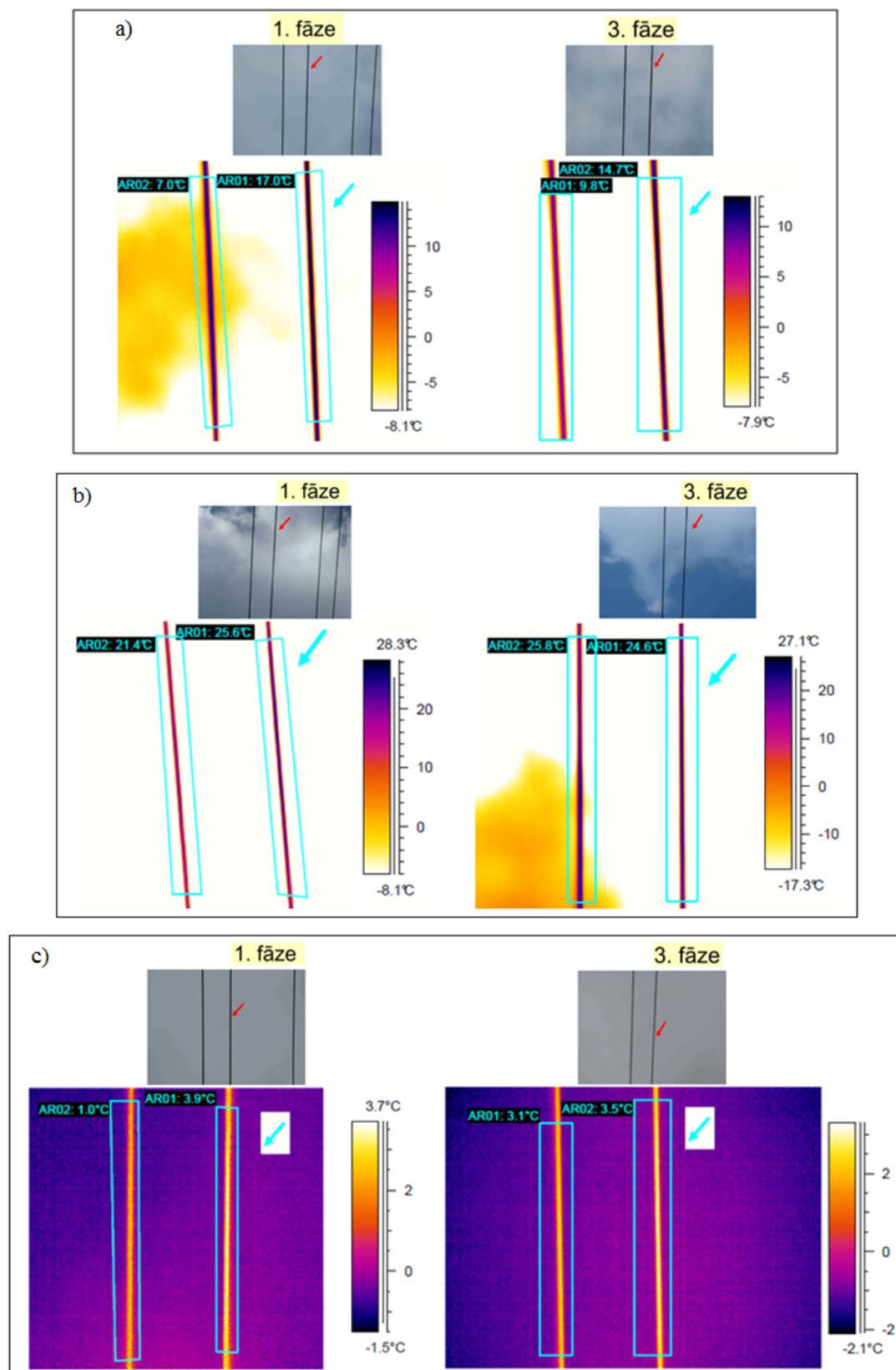
b)



c)



3.2. att. LNr. 600 elektriskās shēmas daļa (a); enkurlaiduma daļa starp balstu Nr. 1 un a/st. „Jāņciems” (b); enkurlaiduma daļa starp balstiem Nr. 1 un Nr. 2 (c)



3.3. att. Eksperimentālie rezultāti GEL LNr. 600 laidumam starp balstiem Nr. 1 un Nr. 2: gadījumam A 1. un 3. fāzei (a); gadījumam B 1. un 3. fāzei (b); gadījumam C 1. un 3. fāzei (c)

3.1.2.2. GEL LNr. 501, LNr. 321, LNr. 303

Eksperimentālie mērījumi veikti šādām GEL (sk. 3.4. att. un 4. pielikumu):

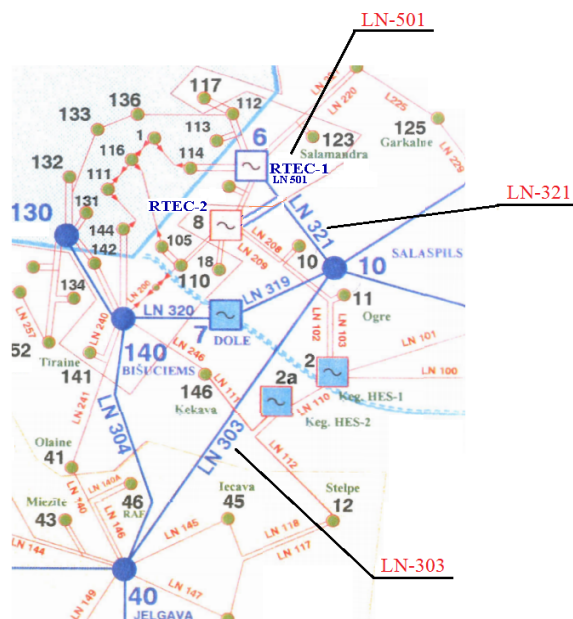
- 1) LNr. 501 laidumam starp balstiem Nr. 53 un Nr. 54 (sk. 3.5. att.);
- 2) LNr. 321 laidumam starp balstiem Nr. 17 un Nr. 18 (sk. 3.6. att.);
- 3) LNr. 303 laidumam starp balstiem Nr. 59 un Nr. 60 (sk. 3.7. att.).

Visi mērījumi veikti 2010. gada 13. jūlijā, un to eksperimentālie rezultāti atspoguļoti 3.2. tabulā.

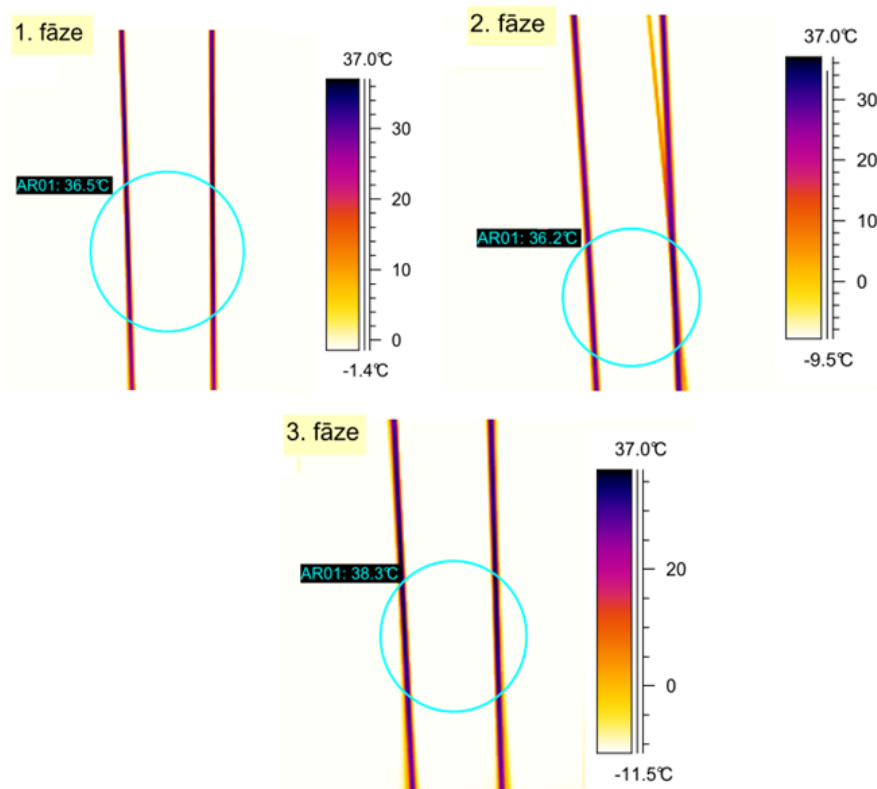
3.2. tabula

GEL LNr. 501, LNr. 321 un LNr. 303 mērījumu rezultāti

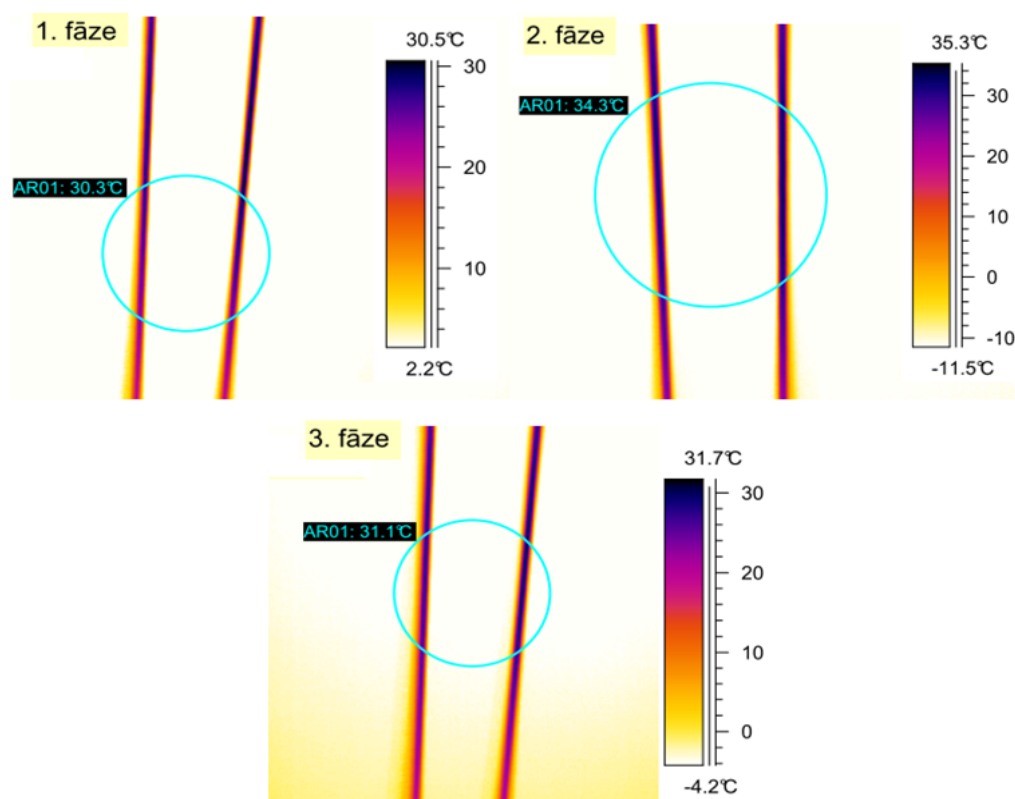
Parametri	GEL		
	LNr. 501	LNr. 321	LNr. 303
	Balsti Nr. 53 – Nr. 54	Balsti Nr. 17 – Nr. 18	Balsti Nr. 59 – Nr. 60
Iegūtie mērījumu dati			
Spriegums, kV	351	352	352
Slodzes strāva, A	230	429	438
Slodzes aktīvā jauda, MW	109	214	258
Slodzes reaktīvā jauda, Mvar	88	150	70
1. fāzes vadu temperatūra (AR01), °C	36,5	30,3	20
2. fāzes vadu temperatūra (AR01), °C	36,2	34,3	24,2
3. fāzes vadu temperatūra (AR01), °C	38,3	31,1	29,3
Gaisa temperatūra (ta), °C	36	30	19
Vadu veids	1xAS-300/39	2xASO-300/39	1xASO-300/39
Pieļaujamā slodzes strāva + 35°C gaisa temperatūrā	560 A	787 A	1214 A
Līniju noslodze, %	41	54	36



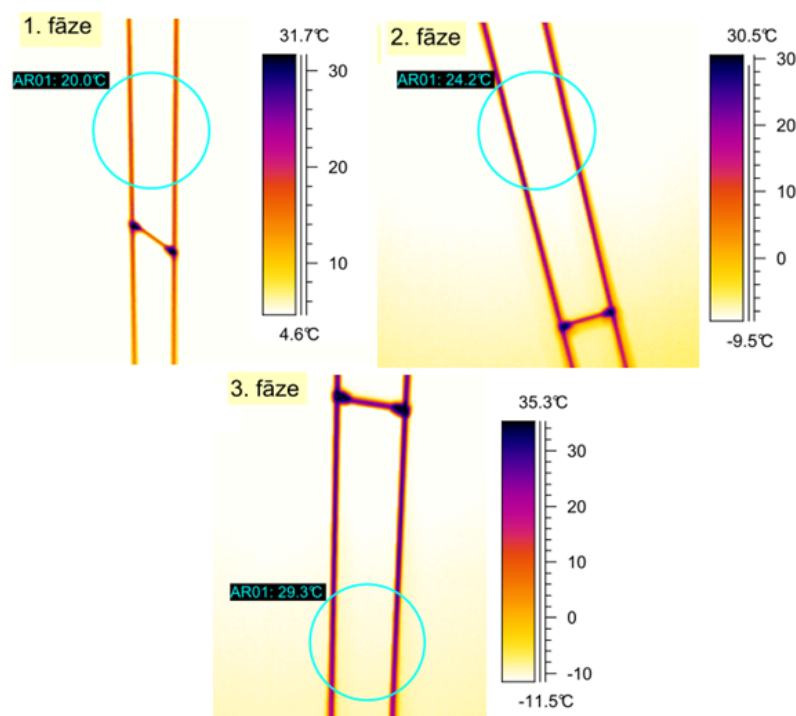
3.4. att. Daļa no GEL LNr. 501, LNr. 321, LNr. 303 elektriskās shēmas



3.5. att. Eksperimentālie rezultāti GEL LNr. 501 laidumam starp balstiem Nr. 53 un Nr. 54



3.6. att. Eksperimentālie rezultāti GEL LNr. 321 laidumam starp balstiem Nr. 17 un Nr. 18



3.7. att. Eksperimentālie rezultāti GEL LNr. 303 laidumam starp balstiem Nr. 59 un Nr. 60

3.2. Modeļu verifikācijas rezultāti

Pastāv divi plaši izplatīti GEL vada temperatūras monitoringa veidi [34, 42]:

- I. Tiešais monitorings nozīmē tiešu vada temperatūras mērīšanu, kas ir neērti no GEL ekspluatācijas viedokļa;
- II. Netiešais monitorings nozīmē termiskās strāvas aplēses metodes, kurās izmanto pieļaujamo vada temperatūru ietekmējošo pamatparametru mērījumus.

Šajā apakšnodaļā aplūkosim divus galvenos GEL pieļaujamās slodzes strāvas monitoringa sistēmas (no termiskā viedokļa) verifikācijas modeļus:

1. tiešais monitorings, izmantojot pamatparametru, piemēram, vada temperatūras, gaisa temperatūras, vēja ātruma, gaisa mitruma mērījumus;
2. netiešais monitorings, izmantojot iepriekšminēto pamatparametru aprēķina vērtības.

3.2.1. GEL pieļaujamās slodzes strāvas monitoringa sistēmas verifikācijas modeļi, izmantojot mērījumu rezultātus

3.2.1.1. GEL LNr. 600

3.3. tabulā parādīti iegūtie aprēķinu rezultāti trim aplūkotajiem gadījumiem A, B un C dažādos vietējos LA un GEL noslodzes apstākļos.

LNr. 600 aprēķinu rezultāti, balstoties uz eksperimentāliem datiem

Izmantotās termiskās strāvas aplēses metodes Aprēķinātie parametri		LNr. 600								
		Gadījums A			Gadījums B		Gadījums C			
		Balsti Nr. 1 – Nr. 2								
	<i>Izmērītais vēja ātrums, m/s</i>	<u>2</u>	<u>3</u>	<u>4</u>	<u>5</u>	<u>1</u>	<u>2</u>	<u>3</u>	<u>4</u>	<u>5</u>
IEEE Std 786-2006	Vada temperatūra, °C	23,4	22,3	21,6	21,2	35,0	31,4	8,9	8,1	7,6
	Vada nokare, m	3,8	3,7	3,7	3,7	4,0	3,9	3,5	3,5	3,4
IEC 1597	Vada temperatūra, °C	20,3	19,7	19,3	19,0	27,1	25,3	5,7	5,3	5,0
	Vada nokare, m	3,7	3,7	3,7	3,7	3,8	3,8	3,4	3,4	3,4
MT 34-70-037-87	Vada temperatūra, °C	17,1	17,1	17,1	17,1	25,1	22,2	3,2	3,2	3,2
	Vada nokare, m	3,6	3,6	3,6	3,6	3,8	3,7	3,3	3,3	3,3

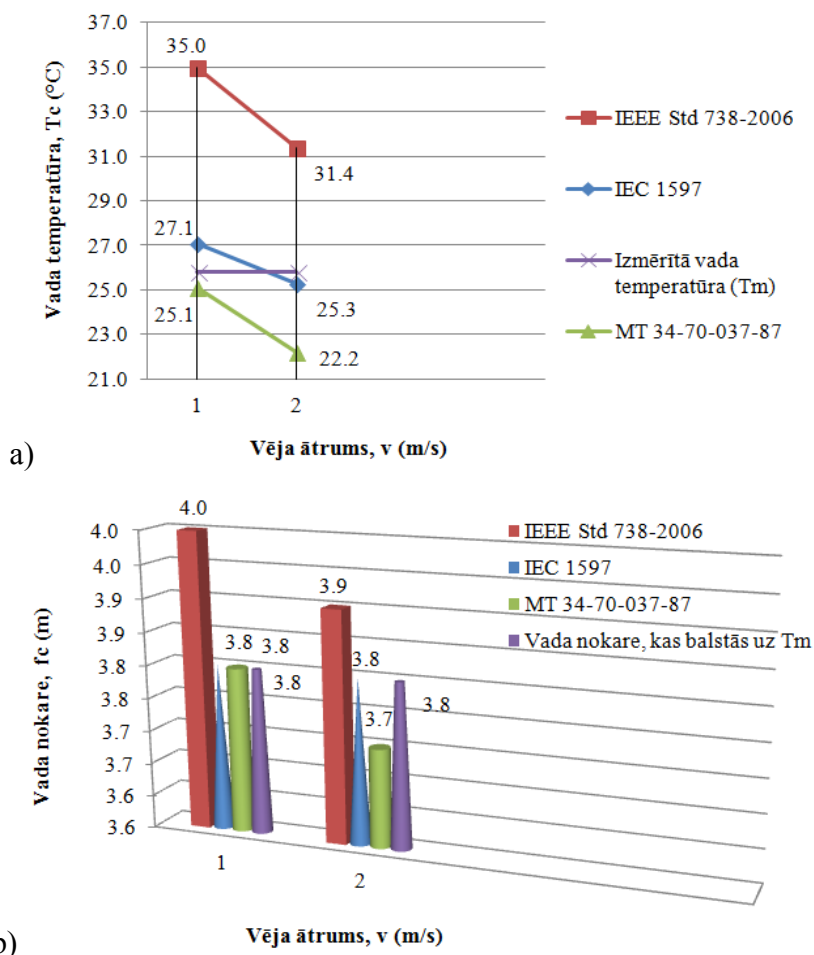
Šajā gadījumā termisko strāvas aplēses metožu izvērtēšanas modeli veido trīs galvenie posmi:

1. izvēlēta esošā GEL, noteikti tās sākotnējie parametri – fizikālie, mehāniskie un elektriskie raksturlielumi;
2. izmērīti vai atbilstoši vietējiem apstākļiem pieņemti nepieciešamie LA, piemēram, šeit veikti gaisa temperatūras, vēja ātruma, gaisa mitruma mērījumi, izmantojot speciālās monitoringa iekārtas, bet Saules radiācijas intensitāte pieņemta pēc pasaules globālās vērtības;
3. novērtētas termiskās strāvas aplēses metodes (IEEE Std 786-2006, IEC 1597 un MT 34-70-037-87), balstoties uz izmērīto un aprēķināto GEL vada temperatūras un iegūto nokares vērtību analīzi pie konkrētajiem LA. Parametru aprēķināšanai izmantoti iepriekšminēto metodiku matemātiskie vienādojumi.

GEL LNr. 600 pētījuma gadījums B, kur redzams vada stacionāro temperatūru salīdzinājums gan mērījumu rezultātā iegūtām, gan aprēķinātām temperatūrām pie dažādām vēja ātruma vērtībām, atspoguļots 3.8. a) attēlā. Šeit mērījumos noteiktā vada temperatūra (T_m), kas vienāda ar 25,8°C (pieņemta 3. fāzes augstākā vada temperatūra), salīdzināta ar aprēķinātajām vada temperatūrām (T_c), kas iegūtas atbilstoši aplūkotajai termiskās strāvas aplēses metodei. Attēlā redzams, ka lielākā atšķirība starp mērījumos noteikto un aprēķināto temperatūru novērojama, izmantojot IEEE standarta metodi 738-2006 ($T_c = 35,0^\circ\text{C}$), tad seko

pieeja IEC 1597 ($T_c = 27,1^\circ\text{C}$), kur procentuālā atšķirība ir mazāka, un, visbeidzot, metode MT 34-70-037-87 ($T_c = 25,1^\circ\text{C}$), kur iegūtā vērtība ir gandrīz identiska T_m pie vēja ātruma 1 m/s. Taču, ja vēja ātrums ir 2 m/s, situācija nedaudz mainās; tādā gadījumā pēc IEC1597 metodes iegūtā T_c vērtība ir praktiski tāda pati kā mērījumos iegūtā vada temperatūra ($T_c = 25,3^\circ\text{C}$), bet pēc pieejas MT 34-70-037-87 iegūtā T_c ir mazāka par T_m ($T_c = 22,2^\circ\text{C}$). Vērts piebilst, ka vada temperatūras vērtības samazinās vēja ātruma iedarbībā: jo augstākas vēja ātruma vērtības, jo lielāki siltuma zudumi konvekcijas dēļ.

Svarīgi atzīmēt, ka gadījumam B mērījumos iegūtā strāva (I_m) ir 162 A, tādēļ GEL noslodze konkrētajā reālajā piemērā (izmantots vads AS-240/32, fāzē ir divi vadi, pieļaujamā vadā plūstošā strāva konkrētajiem apstākļiem gaisa temperatūrā $+ 20^\circ\text{C}$ ir 1271 A) ir tikai 13%.



3.8. att. Iegūtie aprēķinu rezultāti, balstoties uz esošās LNr. 600 eksperimentāliem datiem gadījumam B: a) vada stacionārās temperatūras; b) vada nokares

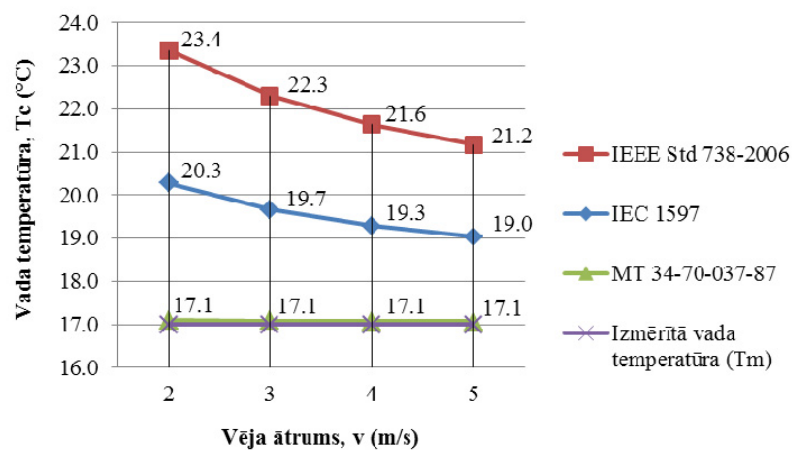
Turklāt par vienu no pamatkritērijiem termiskās strāvas aplēses metožu izvērtēšanai var uzskatīt ne tikai vada temperatūru (termiskais ierobežojums), bet arī vada nokari (mehāniskais ierobežojums), kas ir nozīmīgs ietekmējošs parametrs, pēc kura nosaka gabarītu līdz zemei vai līdz šķērsojamajiem objektiem.

Vadu nokares salīdzinājums atspoguļots 3.8. att. b), kas balstās uz aprēķinos noteiktajām vadu temperatūrām un izmērīto vada temperatūru, izmantojot iepriekšminētās termiskās strāvas aplēses metodes. Attēlā redzams, ka vislielākā vada nokare – līdz 4,0 m – ir novērojama, izmantojot IEEE standarta metodi 738-2006 sakarā ar augstākām aprēķinātajām vadu temperatūrām (sk. 3.8. att. a)); turpretī vismazākā vada nokare – 3,7 m – ir novērojama, izmantojot metodi MT 34-70-037-87. Acīmredzami vadu nokares vērtību atšķirība pastāv; maksimālā atšķirība ir līdz 30 cm.

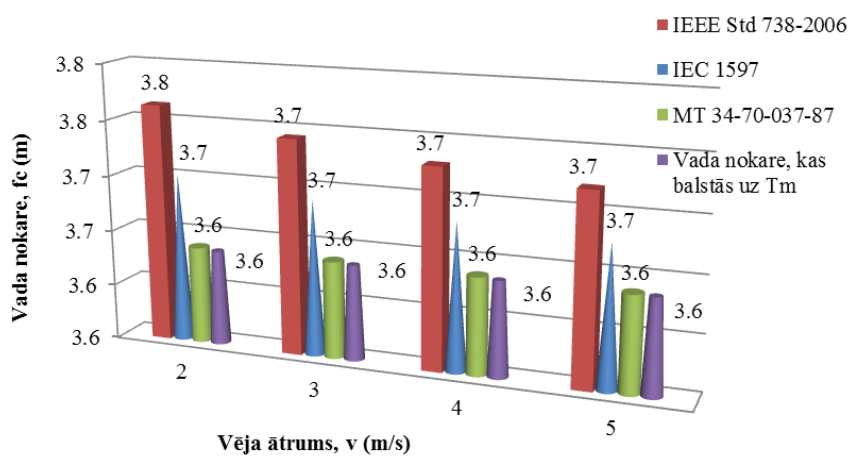
Gadījumiem A un C ir tāds pats salīdzināšanas princips kā gadījumam B (sk. 3.8. att. a) un b)), bet ar atšķirīgiem iegūtajiem rezultātiem citu LA dēļ (sk. 3.1. un 3.3. tabulas).

Attiecībā uz gadījumu A (sk. 3.9. att. a)) T_m ir $17,0^{\circ}\text{C}$ (pieņemta 1. fāzes augstākā vada temperatūra), un to salīdzina ar T_c atbilstoši IEEE standartam 738-2006 ($T_c = 23,4^{\circ}\text{C}$), tad seko pieeja IEC1597 ($T_c = 20,3^{\circ}\text{C}$), un MT 34-70-037-87 ($T_c = 17,1^{\circ}\text{C}$) pie vēja ātruma 2 m/s. Vērts atzīmēt, ka T_c , kas vienāda ar $17,1^{\circ}\text{C}$ pie visiem vēja ātrumiem, izmantojot termiskās strāvas aplēses metodi MT 34-70-037-87, ir tāda pati kā mērījumos noteiktā vada temperatūra ($T_m = 17^{\circ}\text{C}$), tādējādi var secināt, ka šāda termiskās strāvas aplēses metode ir precīza. Turklāt, neraugoties uz atšķirību starp mērījumos un aprēķinos noteiktajām vadu temperatūrām – līdz $6,3^{\circ}\text{C}$ –, vada nokare pie dažādām metodēm ir diezgan līdzīga, tā maksimālā vada nokare ir 3,8 m, ja izmanto IEEE standarta metodi 738-2006, bet mazākā vada nokare – 3,6 m – vērojama, izmantojot metodi MT 34-70-037-87; 3,7 m iegūst ar IEC1597 standarta metodi (sk. 3.9. att. b)), bez tam šādu rezultātu var radīt arī nelielā GEL noslodze, kas ir tikai 3% (mērījumos fiksētā slodzes strāva ir 37 A).

Izanalizējot rezultātus, kas iegūti gadījumam C, šeit redzama tāda pati tendence kā gadījumam A, tomēr, protams, ar mazāku noteikto vada temperatūru atšķirību visām piedāvātajām termiskās strāvas aplēses metodēm un ar mazākām vada nokarēm, jo šajā GEL noslodzes gadījumā – 5%, pieļaujamā vadā plūstošā strāva konkrētajiem LA pie gaisa temperatūras $+5^{\circ}\text{C}$ ir 1452 A (sk. 3.10. att. a) un b)).

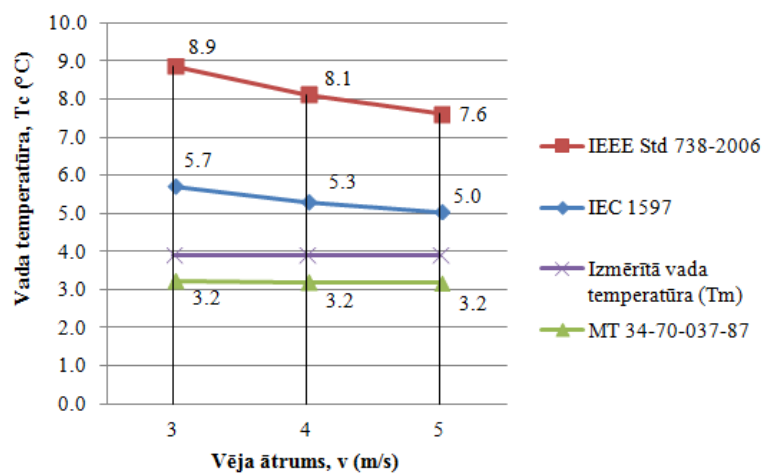


a)

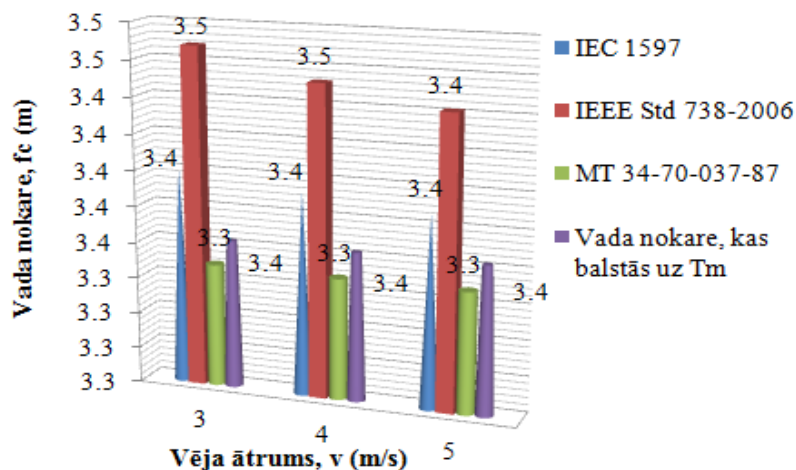


b)

3.9. att. Iegūtie aprēķinu rezultāti, balstoties uz esošās LNr. 600 eksperimentāliem datiem gadījumam A: a) vada stacionārās temperatūras; b) vada nokares



a)



b)

3.10. att. Iegūtie aprēķinu rezultāti, balstoties uz esošās LNr. 600 eksperimentāliem datiem gadījumam C: a) vada stacionārās temperatūras; b) vada nokares

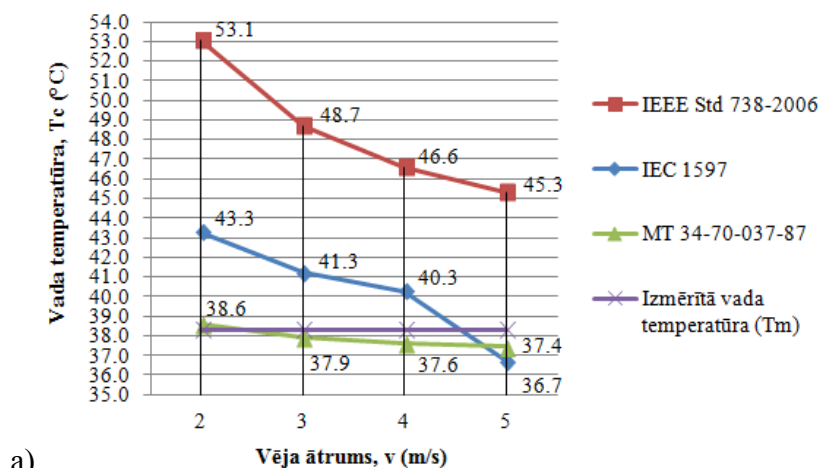
3.2.1.2. GEL LNr. 501

3.11. attēlā sniegts tipisks termiskās strāvas aplēses metožu salīdzinājuma princips kā 3.2. apakšnodaļas 3.2.1.2. punktā (sk. 4.14., 4.15. un 4.16. attēlu), bet ar atšķirīgiem rezultātiem sakarā ar citas GEL izmantošanu un atšķirīgiem LA (sk. 3.2. tabulu).

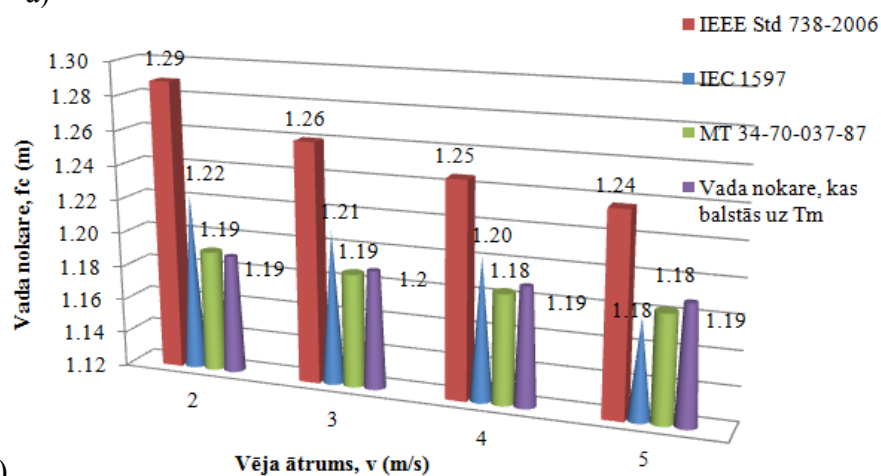
Šajā pētījumā izmērītā vada temperatūra (T_m) ir $38,3^{\circ}\text{C}$, tad 3.11. att. a)) redzams, ka lielākās izmērīto un aprēķināto vada temperatūru atšķirības novērojamas, izmantojot metodi IEEE Std 738-2006, tad seko metode IEC1597, kur atšķirības procents ir mazāks, un pieeja MT 34-70-037-87, saskaņā ar kuru iegūst mazākas aprēķinātās vada temperatūras vērtības salīdzinājumā ar izmērīto temperatūru pie vēja ātrumiem 3, 4, 5 m/s.

Izmērītā strāva (I_m) šim gadījumam ir 230 A, tādēļ GEL noslodze konkrētam esošam piemēram (izmantotais vads ir AS-300/39, fāzē ir viens vads, vadā plūstošā strāva konkrētajiem apstākļiem gaisa temperatūrā $+35^{\circ}\text{C}$ ir 560 A) ir 41%.

3.11. att. b) atspoguļota tā pati salīdzināšanas modeļa koncepcija kā 3.8. att. b), 3.9. att. b), 3.10. att. b), taču šeit maksimālā vada nokare ir 1,29 m, ko konstatē, izmantojot strāvas aprēķinu metodi IEEE Std 738-2006; turpretī vismazākā vada nokare – 1,18 m – novērojama, izmantojot termiskās strāvas aplēses metodes MT 34-70-037-87 un IEC1597. Rezultātā var secināt, ka, neraugoties uz atšķirību starp izmērītajām un aprēķinātajām vada temperatūrām, vada nokare pie dažādām metodēm ir samērā neliela – tikai līdz 11 cm, kas šajā gadījumā var būt saistīts ar nelielu aprēķina laiduma garumu. Tomēr vērts atzīmēt, ka pie lielāka aprēķina laiduma garuma, ievērojot to pašu GEL noslodzi (41%), vada nokare būtu ievērojami lielāka, kas nozīmē, ka vada nokaru procentuālā atšķirība būtiski pieaugtu.



a)



b)

3.11. att. Iegūtie aprēķinu rezultāti, balstoties uz esošās LNr. 501 eksperimentāliem datiem:

a) vada stacionārās temperatūras; b) vada nokares

Tā rezultātā sniegts salīdzinošs novērtējums termiskās strāvas aplēses metodēm – IEEE standartam 738-2006, IEC1597 un MT 34-70-037-87, balstoties uz eksperimentāliem un aprēķinu rezultātiem.

Atšķirību starp mērījumos noteiktajām un aprēķinātajām vada temperatūrām, kā arī aprēķinātajām vada nokares vērtībām pie dažādām termiskās strāvas aplēses metodēm var izskaidrot ar šādiem pamatsecinājumiem:

- 1) vēja ātrums ietekmē aprēķinātās vada temperatūras vērtības, un to ietekmes pakāpe ir atšķirīga; tādējādi nepieciešams aplūkot un apspriest katra GEL piemēra mainīgo raksturu;
- 2) jāievēro un jāizvērtē GEL noslodze kā normālā, tā arī avārijas darba režīmā, lai vājinātu konservatīvo strāvas ierobežojumu, kad līnijas noslodze ir neliela, vai arī, gluži pretēji, lai padarītu esošos ierobežojumus stingrākus, kad pastāv būtiska GEL noslodze (jāņem vērā pielāgošana faktiskai līnijas noslodzei), turklāt, jo augstāka ir līnijas procentuālā

noslodze, jo rodas lielāka atšķirība starp gaisa un vada temperatūrām; nav svarīgi, vai vada temperatūra noteikta ar mērījumiem vai ar aprēķiniem;

- 3) jānosaka un jāievēro vada temperatūras paaugstināšanās procentuālā rezerve, kas termiskās strāvas aplēses metodikās tiek pieņemta dažādi, kā arī papildu zudumi vada pretestības dēļ, jo slodzes strāvas vērtību piespiedu kārtā samazina par šīs procentuālās daļas lielumu sakarā ar papildu konservatīvu ierobežojumu;
- 4) jāievēro dažādu empīrisku paņēmienu izmantošana aplūkotajās aprēķinu metodēs, kā arī šo metožu sarežģītība.

Neraugoties uz atšķirību, kāda pastāv starp mērījumos iegūtajām un aprēķinātajām vada temperatūrām aplūkotajiem gadījumiem, visas apskatītās termiskās strāvas noteikšanas metodikas ir samērā precīzas, ko apstiprina iegūtie vada nokares aprēķina rezultāti – maksimālā atšķirība ne lielāka par 30 cm. Tomēr šādas atšķirības pastāvēšanu nevar noliegt un ar to jāreķinās, it īpaši gadījumos, kad GEL noslodze ir ievērojama un ir liels aprēķina laidums, jo tad vada nokare jau būtu jūtami lielāka un tas ārkārtīgi ietekmētu gabarītu (starp vadu un zemi vai šķērsojamiem objektiem) lielumu izmaiņas.

Vērts atzīmēt, ka lielāka GEL noslodze parasti iespējama, ja izmanto faktiskos izmērītos LA; diemžēl tradicionālās statistiskās strāvas vērtības ir pārlietu konservatīvas, tā kā tās balstās uz pesimistiskiem LA pieņēmumiem (visnelabvēlīgākais gadījums). Piemēram, ja aprēķinos iegūtās vada temperatūras ir stipri zemākas par maksimāli pieļaujamo vada temperatūru, tad var konstatēt, ka līnijas noslodze ir nepilnīga – GEL nav optimāli izmantota, taču tai pašā laikā tā nedrīkst pārsniegt pieļaujamo vada temperatūru, kuru nosaka izgatavotājrūpnīca atkarībā no izvēlēta vada tipa un tā šķērsgriezuma. Savukārt faktisko vada temperatūras datu izmantošana ļautu kontrolēt GEL termisko strāvu elastīgākā veidā, izmantojot speciālas monitoringa sistēmas, kuru darbībai jābalstās uz maksimāli precīzu GEL maksimālās reāllaika strāvas aplēses metodi.

Šajā darbā galvenā uzmanība pievērsta piemērotākās metodes izvēlei GEL pieļaujamās strāvas aprēķināšanai, uz kā pamata ir iespējams izstrādāt reāllaika termiskā monitoringa sistēmu, kas sniegtu iespēju īstenot distances sensoru datu integrēšanu komunikācijas un enerģijas vadības sistēmās, tādēļ ir nepieciešams rūpīgi izpētīt izvēlētais metodes teorētisko pieeju, līdz pat eksperimentālu mērījumu izmantošanai, balstoties uz vienkāršotām monitoringa iekārtām.

3.2.1.3. GEL LNr. 501, LNr. 321 un LNr. 303

Šīs apakšnodaļas punktā 3.2.1.1. un 3.2.1.2. sniegta vada temperatūras un nokares iegūto rezultātu analīze, kas palīdzēja eksperimentālās pārbaudes rezultātā noteikt vispiemērotāko (precīzāko) termiskās strāvas aplēses metodi – MT 34-70-037-87, kas tālāk tiks izmantota GEL termiskās monitoringa sistēmas sintezētā algoritma izstrādei.

Līdz ar to šeit tiks aplūkoti iegūtie esošo GEL LNr. 501, LNr. 321 un LNr. 303 aprēķina un izmērītās slodzes strāvas rezultāti, kas balstās uz iepriekš izvēlētas termiskās aplēses strāvas metodes – MT 34-70-037-87 – teorētiskās bāzes, kā arī uz mērījumu rezultātiem.

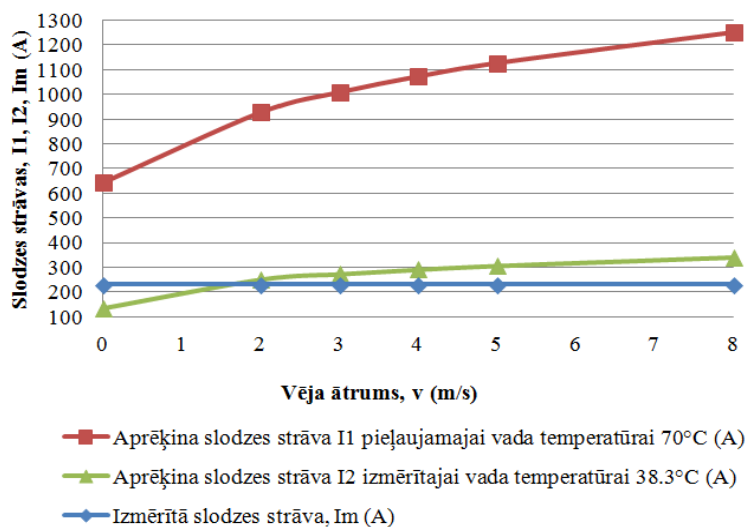
Iegūtie mērījumu rezultāti konkrētajām esošajām 330 kV GEL RTEC-1 – RTEC-2 (LNr. 501), RTEC-2 – SALASPILS (LNr. 321), SALASPILS – JELGAVA (LNr. 303) sniegti 3.2. tabulā (sk. 3.4. att. un 4. pielikumu).

Šajā gadījumā aplūkota GEL slodzes strāvas pieļaujamo izmaiņu ietekme, kas atkarīga no konkrētajiem LA un nepieciešamajiem standarta gabarītiem, balstoties uz Latvijas enerģosistēmas izvēlētajiem GEL datiem.

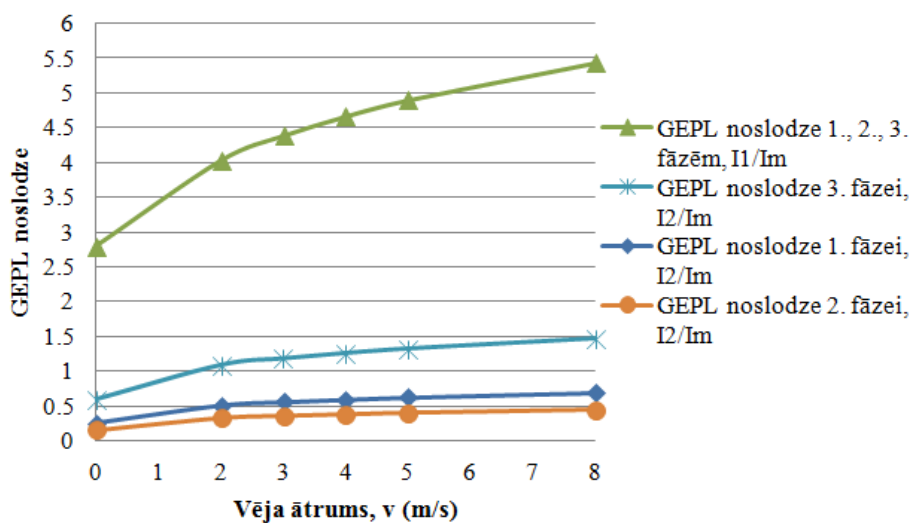
Vispirms nosaka pieļaujamo vada temperatūru atkarībā no izvēlēta vada tipa (tā kā esošie vadi ir tradicionālā tipa vadi, tad to pieļaujamā temperatūra ir 70°C) [146]; pēc tam saskaņā ar mērījumu rezultātiem pieņem faktisko vada temperatūru atkarībā no aplūkojamās esošās GEL piemēra, kāda novērojama pie šīs GEL noslodzes un vietējiem uzņemtajiem LA. Rezultātā šie novērtēšanas nosacījumi veido pamatu GEL slodzes strāvas modelēšanai.

LNr. 501 iegūtie dati atspoguļoti 3.12. un 3.13. attēlā, kur redzams, ka aprēķinos iegūtajām strāvas vērtībām, kas bija balstītas uz faktisko vada temperatūru 38,3°C, ir tendence paaugstināties līdz ar vēja ātruma paaugstināšanos. Līdz ar to, izmantojot pieļaujamo vada temperatūru slodzes strāvas noteikšanai, var redzēt, ka aprēķinātā strāva (I1) pie pieļaujamās vada temperatūras 70°C ir līdz trīs reizēm lielāka nekā aprēķinātā strāva (I2), balstoties uz mērījumos noteikto vada temperatūru pie vēja ātruma 0 m/s, bet pie vēja ātruma 2 – 8 m/s I2 ir lielāka nekā mērījumos noteiktā strāva (Im=230A) (sk. 3.12. att.). Savukārt 3.13. att. parādīti GEL noslodzes analīzes rezultāti, kur redzams, ka GEL noslodze pieaug, pieaugot vada temperatūrai, piemēram, GEL noslodze 1., 2. un 3. fāzei (I1/Im), pieņemot šādam modelēšanas uzdevumam vada pieļaujamo temperatūru 70°C, acīmredzami ir lielāka nekā līnijas noslodze 3. fāzei (I2/Im), kur ievēro vada faktisko temperatūru (38,3°C); šis apgalvojums attiecas arī uz 1. fāzi (šeit vada faktiskā temperatūra pieņemta vienāda ar 36,5°C) un 2. fāzi (vada faktiskā

temperatūra – 36,2°C). Tātad var secināt, ka LNr. 501 nav pilnībā noslogota un tās strāvas rezerve nav izmantota.



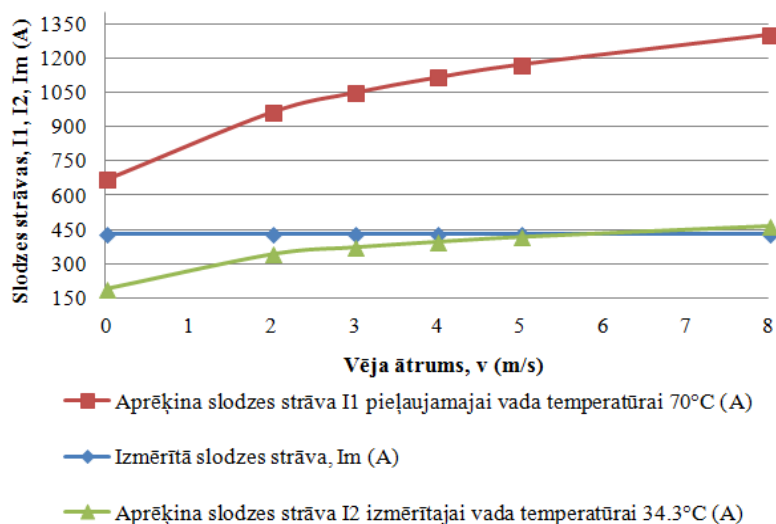
3.12. att. LNr. 501 slodzes strāvas vērtības (I1, I2) atkarībā no vēja ātruma, pieļaujamās un mērījumos noteiktās vada temperatūras gaisa temperatūrā 36 °C



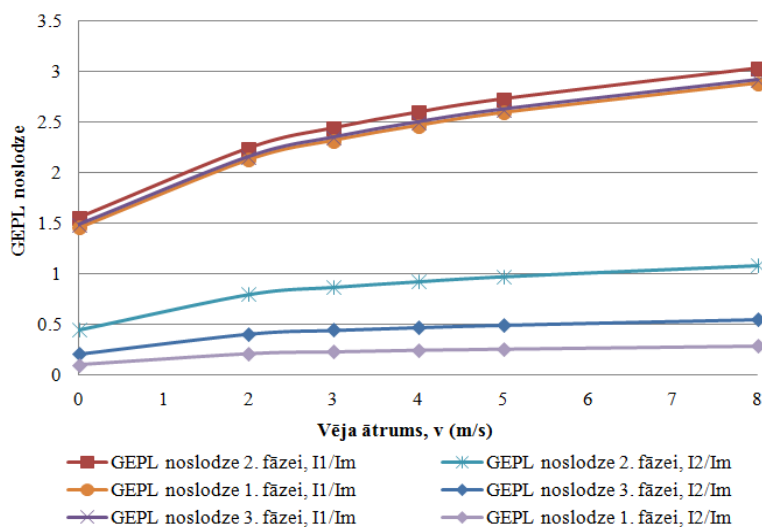
3.13. att. LNr. 501 noslodze atkarībā no vēja ātruma, pieļaujamās un vada fāžu mērījumos noteiktajām temperatūrām gaisa temperatūrā 36°C, reducējot to uz vada faktisko izmērīto slodzes strāvu (Im = 230 A)

Slodzes strāvas modelēšana LNr. 321 balstījās uz iepriekšminētajiem analīzes novērtēšanas nosacījumiem, izņemot vada temperatūru, kas šeit pieņemta pēc mērījumu rezultātiem – 34,3°C (visnelabvēlīgākais gadījums). Rezultāts izrādījās līdzīgs kā iepriekš aprakstītajai LNr. 501, taču šajā gadījumā mērījumos noteiktā strāva (Im) pārsniedz aprēķinos noteikto strāvu (I2), balstoties uz vada faktisko temperatūru 34,3°C pie vēja ātruma 0 – 7 m/s, bet jau pie vēja ātruma 8 m/s situācija mainās – I2 pārsniedz Im (sk. 3.14. att.). Kas attiecas uz

LNr. 321 noslodzes rezultātiem (sk. 3.15. att.), var secināt, ka šajā gadījumā aprēķinos noteiktajai slodzes strāvai (I_1) ir mainīgs raksturs, ko rada dažādās pieļaujamās vada temperatūras vērtības atkarībā no mērījumos noteiktās temperatūras katrai vada fāzei salīdzinājumā ar iepriekš iegūtajiem GEL datiem. Vislielākā noslodze novērojama 2. fāzei acīmredzami visaugstākās vada fāzes izmērītās temperatūras dēļ ($34,3^{\circ}\text{C}$), tad 3. fāzei ($31,1^{\circ}\text{C}$) un 1. fāzei ($30,3^{\circ}\text{C}$).



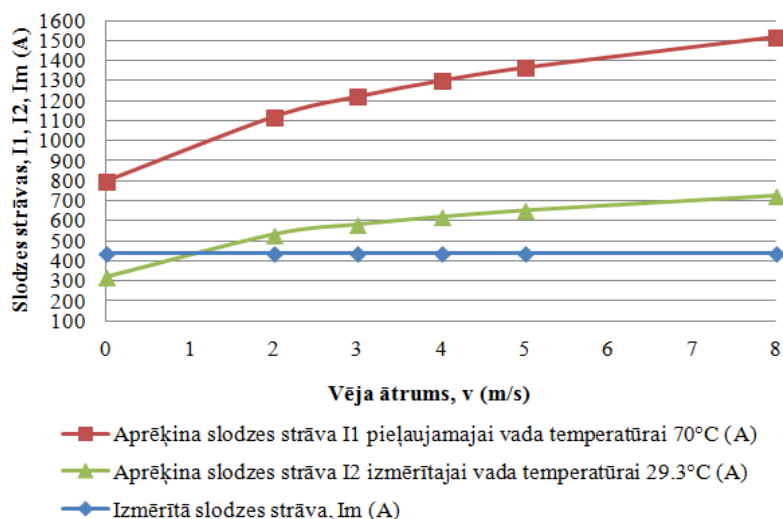
3.14. att. LNr. 321 slodzes strāvas vērtības (I_1 , I_2) atkarībā no vēja ātruma, pieļaujamās un mērījumos noteiktās vada temperatūras gaisa temperatūrā 30°C



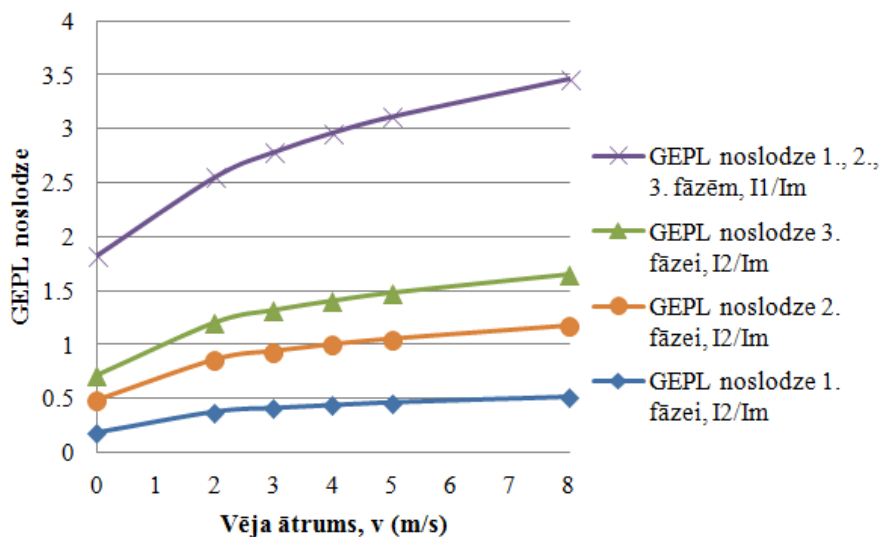
3.15. att. LNr. 321 noslodze atkarībā no vēja ātruma, pieļaujamās un vada fāžu mērījumos noteiktajām temperatūrām gaisa temperatūrā 30°C , reducējot to uz vada faktisko izmērīto slodzes strāvu ($I_m = 429 \text{ A}$)

Nākamais aplūkojamais gadījums ir esošā 330 kV LNr. 303 (sk. 3.16. un 3.17. att.), kur redzamas aprēķinātās slodzes strāvas vērtības (I_2), kas balstās uz faktisko vada temperatūru

29,3°C un ir līdz 2,5 reizēm mazākas nekā aprēķinātā strāva (I1) pie pieļaujamās vada temperatūras 70°C pie vēja ātruma 0 m/s. Savukārt pie vēja ātruma 1 – 8 m/s I2 pieaug, tādējādi pārsniedzot faktisko izmērīto slodzes strāvu ($I_m=438$ A). GEL noslodzes analīzes rezultāti ir līdzīgi kā LNr. 501, kur redzams, ka GEL noslodze pieaug, pieaugot vada temperatūrai, bet ar mazāko noslodzi – maksimāli 3,5.



3.16. att. LNr. 303 slodzes strāvas vērtības (I1, I2) atkarībā no vēja ātruma, pieļaujamās un mērījumos noteiktās vada temperatūras gaisa temperatūrā 19°C

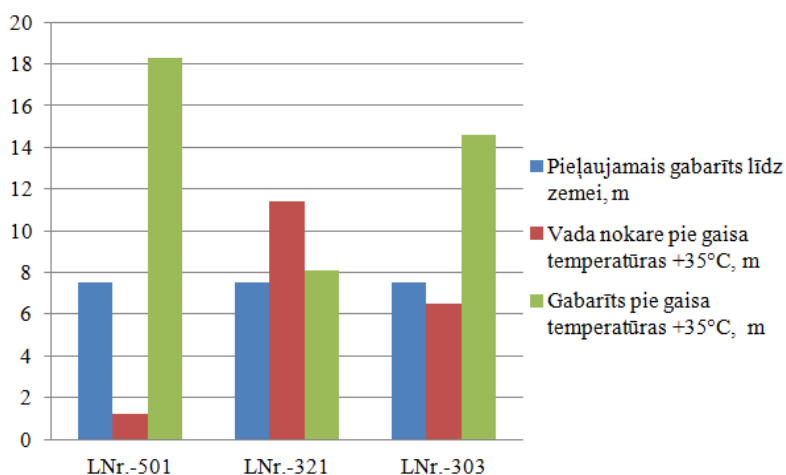


3.17. att. LNr. 303 noslodze atkarībā no vēja ātruma, pieļaujamās un vada fāžu mērījumos noteiktajām temperatūrām gaisa temperatūrā 19°C, reducējot to uz vada faktisko izmērīto slodzes strāvu ($I_m = 438$ A)

Sniegtie modelēšanas piemēri apraksta GEL noslodzes strāvas termisko ierobežojumu, protams, ievērojot mehānisko ierobežojumu (vada nokari un gabarītu).

Mehāniskā ierobežojuma galvenais nosacījums – gabarīts līdz zemei pie pieņemtās maksimālās gaisa temperatūras $+35^{\circ}\text{C}$ (visnelabvēlīgākais gadījums Latvijas vietējos apstākļos) [146] – atspoguļots 3.18. att. Visos gadījumos aprēķina gabarīts salīdzinājumā ar pieļaujamo gabarītu (7,5 m) ir lielāks, nekā tam jābūt pēc spēkā esošajām normām. Analizējot katras atsevišķās GEL vada nokari, var secināt, ka esošajai LNr. 321 nokare ir vislielākā, kas nozīmē pieļaujamā vertikālā gabarīta līdz zemei samazinājumu; tam ir viens negatīvs aspekts – LNr. 321 slodzes strāvas palielinājums apskatāmajā laidumā, ko ierobežo balsti Nr. 17 un 18, nepieciešamības gadījumā nav pieļaujams, pat neskatoties uz termiskā ierobežojuma – slodzes strāvas – palielinājuma iespēju (sk. 3.15. att.). Piemēram, ievērojot mērījumu rezultātus esošajām GEL konkrētos laidumos un pie noteiktiem nosacījumiem, var secināt, ka:

- a) LNr. 501 pie gaisa temperatūras 36°C nokare ir 1,2 m, kas ir tāda pati kā 35°C temperatūrā;
- b) LNr. 321 pie gaisa temperatūras 30°C nokare ir 11,2 m, kas ir par 2% mazāk nekā 35°C temperatūrā;
- c) LNr. 303 pie gaisa temperatūras 19°C nokare ir 6,1 m, kas ir par 6% mazāk nekā 35°C temperatūrā.



3.18. att. Aplūkojamo GEL vadu nokares un gabarīti

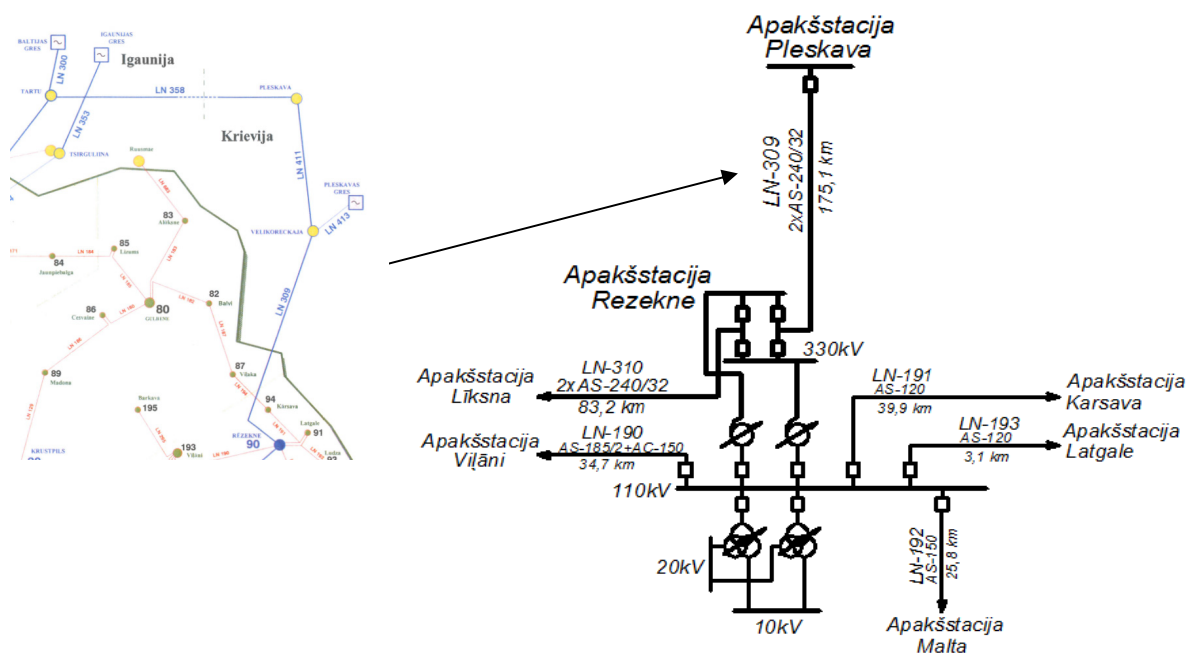
Pārējo esošo GEL aprēķinu piemēru termiskās slodzes strāvas izvērtēšanas koncepcijas analīzi var aplūkot [33, 34, 38, 42].

3.2.2. GEL pieļaujamās slodzes strāvas monitoringa sistēmas verifikācijas modeļi, izmantojot skaitļošanas rezultātus

Šajā apakšnodaļas punktā atspoguļota termisko un mehānisko ierobežojumu ietekme uz esošo GEL slodzes strāvu ar mērķi noteikt līnijas slēpto strāvas rezervi, izmantojot metodes

MT 34-70-037-87 teorētisko bāzi un balstoties uz konkrētu GEL aprēķinu piemēru saskaņā ar aprēķina nosacījumu pamatprasībām. Proti, tiek aplūkota vada temperatūras ietekme uz pieļaujamo slodzes strāvu, ievērojot normatīvo gabarītu līdz zemei un LA. Šajā gadījumā maksimālo vada temperatūru pieņem kā jau zināmu lielumu, tādējādi, pamatojoties uz šo nosacījumu, aprēķina pieļaujamo slodzes strāvu.

Esošā GEL Valmiera – Pļaviņu HES (LNr. 309) izvēlēta sakarā ar pamatmērķi – palielināt esošās GEL caurlaides spēju un paaugstināt energosistēmas drošumu valstī nacionālā mērogā, un tās garums ir 175,1 km (sk. 3.19. att. un 4. pielikumu).



3.19. att. Esošās GEL LNr. 309 elektriskā shēma

Šī līnija tika uzcelta 1985. gadā, lai palielinātu 330 kV starpsistēmas tranzīta caurlaides spēju starp Latviju un Igauniju starptautiskā perspektīvā, kā arī EPT drošumu valsts dienvidaustrumu daļā valsts perspektīvā.

LNr. 309 izvēlēta pastāvošas problēmas dēļ: nokare laidumā starp balstu Nr. 419 un Nr. 420 ir atbilstīga pieļaujamajam gabarītam līdz zemei, kas nozīmē, ka šajā „šaurajā vietā” nav gabarīta rezerves – zināmā mērā kritisks GEL posms. Balsts Nr. 419 ir starpbalsts PB 330-3 (sk. 5. pielikumu), savukārt balsts Nr. 420 ir unificētais enkurbalsts U 330-3 (sk. 6. pielikumu). Aplūkotie balsti paredzēti, lai piekārtu divus vadus fāzē, šo balstu aprēķina sākotnējie nosacījumi redzami 3.4. tabulā.

LNr. 309 balsta aprēķina sākuma nosacījumi

Apzīmējums	Balstu īpašības	Mērvienība	PB 330-3	U 330-3
C	Apledošanas biezums	mm	10	10
Q	Vēja spiediens	kg/mm ²	50	40
h	Virtenes piekāršanas augstums pie apakšējās traversas	m	22.9	19.3
λ	Piekarvirtenes garums	m	3.2	0
h_b	Balsta augstums	m	27	19.3
L_{tr}	Vidējās traversas izvirzījums	m	8,3	8,0
M	Balsta masa ar cinku	kg	6392	6134
σ_{max}	Pieļaujamais mehāniskais spriegums vadā pie maksimālās slodzes	kg/mm ²	11.3	13.2
σ_{min}	Pieļaujamais mehāniskais spriegums vadā pie minimālās temperatūras	kg/mm ²	10.0	10.8
σ_{eks}	Pieļaujamais mehāniskais spriegums vadā vidējās ekspluatācijas apstākļos	kg/mm ²	8.1	8.4
C_z	Gabarīts līdz zemei pie $t = +35^\circ\text{C}$	m	8.0	8.0

Kas attiecas uz GEL vadiem, šeit izmantoja tēraudalumīnija vadu (AS), kas ir plaši pazīstams EPT jomā, jo tas ir samērā drošs un ar salīdzinoši zemām izmaksām (vada tehniskos parametrus sk. 3.7. tabulā).

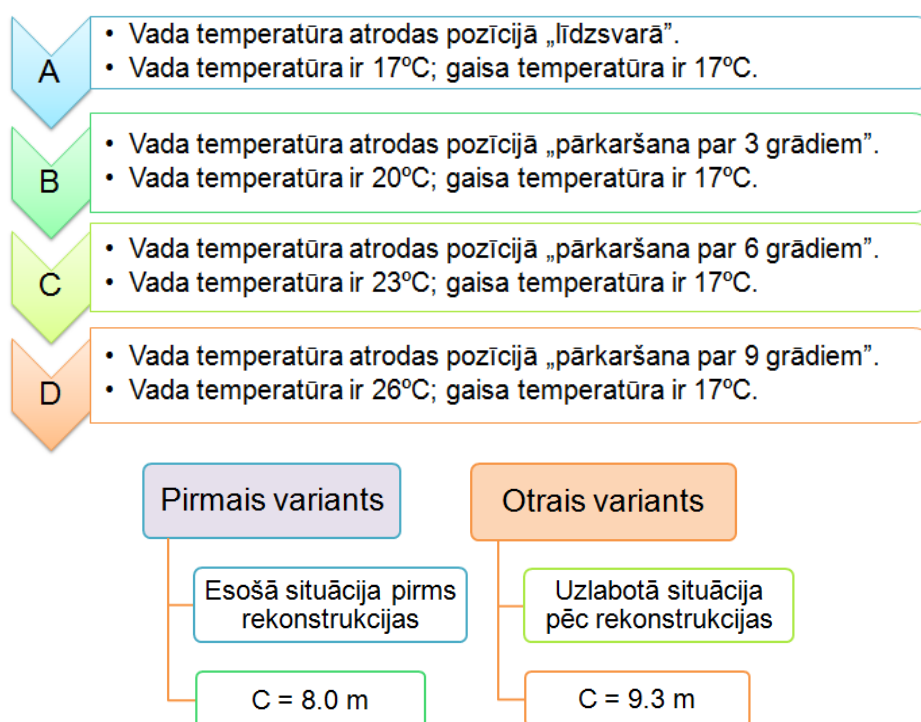
Galveno interesi šajā pētījumā piesaista konkrētas līnijas silšanas slodze. GEL strāvas robežnosacījumi, ieskaitot maksimāli pieļaujamo vada temperatūru, ir definēti saskaņā ar esošajiem standartiem. Tā rezultātā 70°C ir pieņemts par AS vada pieļaujamās temperatūras limitējošo vērtību saskaņā ar tās termiskajiem un mehāniskajiem ierobežojumiem [146].

Balstoties uz esošo GEL, kā arī konkrētiem izejas datiem, kas iepriekš ir detalizēti aprakstīti, izvirzījām vairākus pētījuma uzdevumus, lai noteiktu ieteiktās metodes koncepciju.

GEL slēptās strāvas noteikšana balstās uz pieļaujamās vada temperatūras palielinājumu, līdz ar to arī pieļaujamās strāvas palielinājumu, kas savukārt pamatojas uz GEL gabarīta līdz zemei rezerves noteikšanu. Tad, zinot vada pieļaujamo temperatūru, var noteikt vada pieļaujamo slodzes strāvu.

Vada temperatūru var noteikt, izmantojot divus dažādus paņēmienus: pirmkārt, lietojot speciālu termovīzijas iekārtu (sk. 3.1. apakšnodaļas rezultātus) vai temperatūras sensorus, kas pārsvarā izmantojami GEL dinamiskajās monitoringa sistēmās [29], otrkārt, kas tiek praktizēts visbiežāk, matemātisku aprēķinu ceļā.

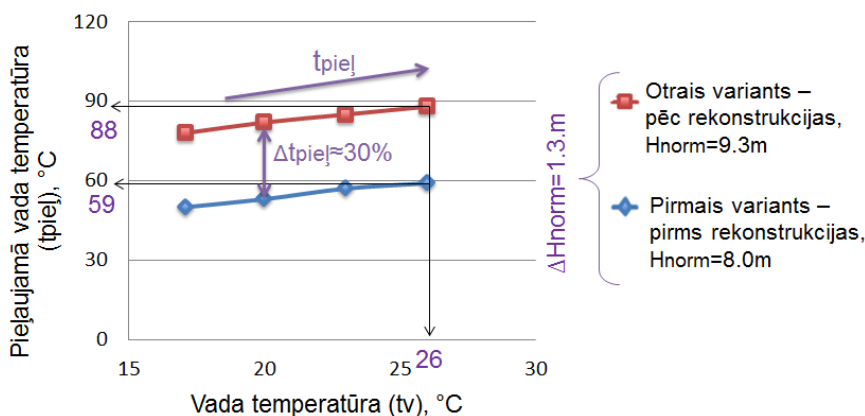
Šajā pētījumā vadu novērtē pēc četriem dažādiem nosacījumiem – A, B, C un D, kas balstās uz siltuma bilances vienādojuma koncepciju (sk. 3.20. att.). Citiem vārdiem sakot, variants A rāda, ka absorbētā siltuma daudzums vadā ir vienāds ar izkliedētā siltuma daudzumu vadā; variants B rāda, ka vada temperatūra ir par trim grādiem lielāka salīdzinājumā ar gaisa temperatūru; variants C – vada temperatūra ir par sešiem grādiem lielāka salīdzinājumā ar gaisa temperatūru; D – vada temperatūra ir par deviņiem grādiem lielāka salīdzinājumā ar gaisa temperatūru. Pieņemts, ka vadam eksistē dabīgā konvekcija – vēja ātrums ir 2 m/s, un tas ir vērsts perpendikulāri vada asij (visnelabvēlīgākais gadījums no vēja slodzes viedokļa).



3.20. att. Pētījuma koncepcija

Tā kā šī pētījuma galvenais mērķis ir noteikt konkrētās GEL (posms starp balstiem Nr. 419 un Nr. 420) slodzes strāvas rezervi, izskatīsim divus variantus (sk. 3.20. att.). Pirmais variants iepazīstina ar reālo situāciju pirms rekonstrukcijas, kad pastāv konkrēta problēma – eksistē mehānisks ierobežojums, proti, neliels gabarīts starp vadu un zemi – tikai 8,0 m –, kas ir pieļaujams normatīvo gabarītu robežās. Tieši tāpēc, lai atrisinātu pastāvošo problēmu, tika nolemts paaugstināt enkurbalsta augstumu. Otrs variants atspoguļo rezultātu jau pēc rekonstrukcijas, kad gabarīts līdz zemei palielinās un kļūst 9,3 m zemākajā punktā laiduma vidū. Rezultātā vada pieļaujamo temperatūru nosaka, balstoties uz diviem aplūkotajiem variantiem un ievērojot apstākļus A, B, C un D.

Analizējot iegūtos rezultātus, var secināt, ka pieļaujamajai vada temperatūrai piemīt pieauguma tendence līdz ar vada temperatūras palielinājumu, tas redzams abos variantos. Turklāt pieļaujamā vada temperatūra svārstās no 50°C līdz 88°C, kas nozīmē, ka 70°C (temperatūra, kas ir reglamentēta pēc [146]), aplūkojamajai līnijai nav termiskais ierobežojums (sk. 3.21. att.). Turklāt pirmajam variantam, kas ir visnelabvēlīgākais, pieļaujamās vada temperatūras vērtības ir mazākas, salīdzinot ar otro variantu, kas ir labvēlīgs, jo šajā gadījumā ir lielāks gabarīts līdz zemei, tādējādi mehāniskā ierobežojuma ietekme (vada nokare) otrajā gadījumā ir neliela.



3.21. att. Vada pieļaujamās temperatūras atkarībā no termiskā ierobežojuma – vada temperatūras un mehāniskā ierobežojuma – gabarīta

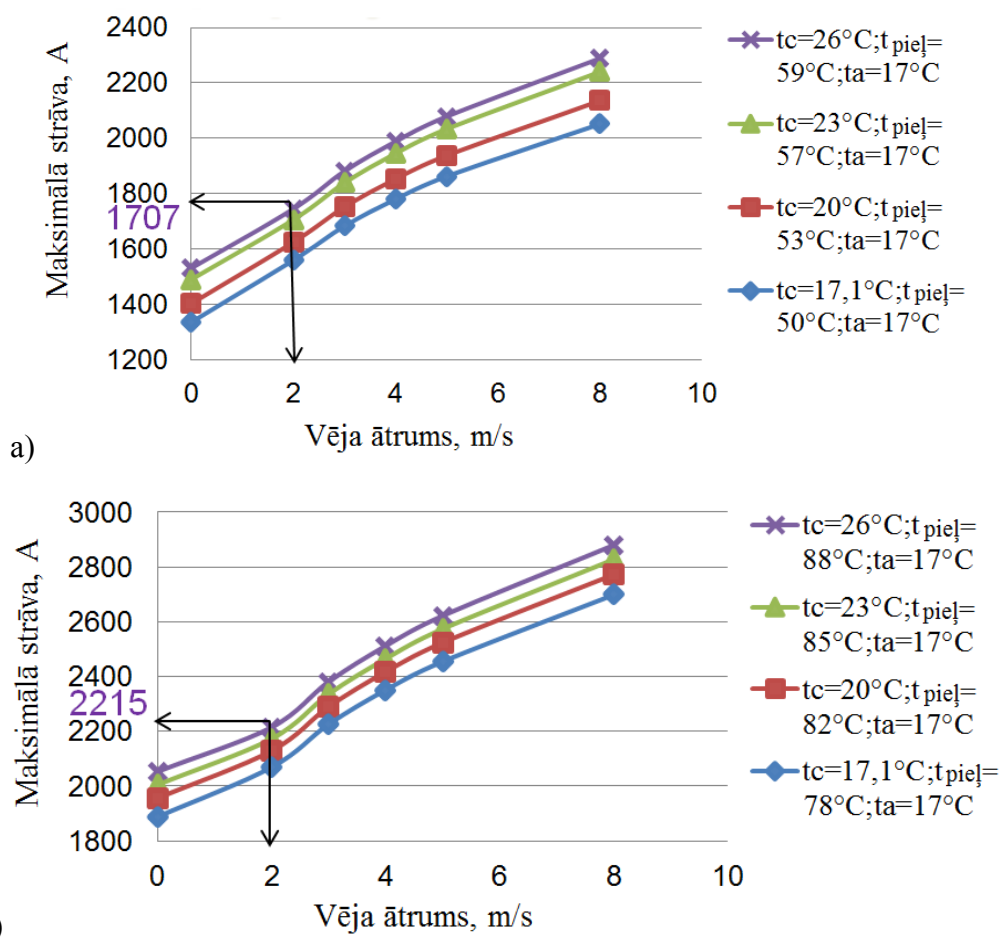
Zinot pieļaujamo vada temperatūru, var noteikt GEL strāvas rezervi, kas ietver starpību starp diviem pārbaudītajiem variantiem, šajā gadījumā tas ir mehāniskais ierobežojums – gabarīts starp vadu un zemi.

Pirmā varianta rezultāti atspoguļoti 3.22. attēlā a), kas norāda maksimālās strāvas atkarību no termiskā ierobežojuma – vada temperatūras, pieļaujamās vada temperatūras, kā arī mehāniskā ierobežojuma un LA.

Otrā varianta rezultāti atspoguļoti 3.22. attēlā b), kas rāda maksimālās strāvas atkarību no tiem pašiem termiskajiem, mehāniskajiem ierobežojumiem, kā arī LA, bet ar lielāku gabarītu starp vadu un zemi – 1,3 m. Šī gabarīta rezerve ļauj palielināt maksimālo slodzes strāvu GEL, ņemot vērā termisko ierobežojumu un noteiktos LA. Patiešām, elektrolīnijas strāvas rezerve palielinājās līdz ar gabarīta palielināšanos starp vadu un zemi.

Piemēram, pirmajā variantā, ja vada temperatūra pieņemta 26°C, vēja ātrums 2 m/s, gaisa temperatūra ir 17 °C (aplūkojam variantu D), tad maksimālā strāva ir 1707 A (sk. 3.22. attēlā a)), savukārt otrajā variantā, pēc rekonstrukcijas, pie tādiem pašiem nosacījumiem, strāva jau palielinās līdz pat 2215 A (sk. 3.22. attēlā b)). Analizējot

maksimālās strāvas starpību, var secināt, ka otrais variants konstatē jaudas rezerves esamību konkrētā GEL, kas balstās uz četriem pārbaudītajiem nosacījumiem un vairākām klimata apstākļu kombinācijām, kas ļauj izmantot aptuveni par 30% vairāk strāvas, nepasliktinot novērotās GEL elektriskos parametrus.



3.22. att. Vada maksimālā slodzes strāva, balstoties uz pamatnosacījumiem:
a) pirmajam variantam; b) otrajam variantam

Iegūtie pieļaujamās vada temperatūras un maksimālās slodzes strāvas aprēķina rezultāti, kas balstās uz metodes MT 34-70-037-87 teorētisko bāzi, palīdz novērtēt iespējamo papildu gabarītu, ļauj atklāt slēpto strāvas rezervi un uzlabot maksimālās slodzes strāvas noteikšanas precizitāti aplūkotojā GEL piemērā, ņemot vērā gan termiskos, gan mehāniskos ierobežojumus, kā arī LA. Tā rezultātā starpību vai papildu rezervi nosaka, palielinot gabarītu starp vadu un zemi, tādējādi ļaujot atrast esošās vai projektējamās GEL papildu caurlaides spēju.

Pārējo esošo GEL aprēķinu piemēru termiskās slodzes strāvas izvērtēšanas koncepcijas analīzi var aplūkot [32, 33, 36, 38, 113].

3.3. Esošo GEL vadu nomaiņas un režīmu vadības iespējas

Pastāv dažādi risinājumi, kas ļauj uzlabot esošo GEL darbības efektivitāti – palielināt ierobežoto līnijas caurlaides spēju un paaugstināt to drošumu, piemēram, jauno tehnoloģiju izmantošana elektroenerģētikā un viedo devēju ieviešana apvienojumā ar informācijas pārraides un apstrādes sistēmām. Esošo GEL jaudas rezerve ir aktuāls jautājums, kuru nepieciešams izskatīt, ņemot vērā dažādus aspektus.

Galvenais uzdevums, gan būvējot jaunu, gan ekspluatējot esošo GEL, ir izmaksu samazināšana elektroenerģijas pārvadē, ko var panākt, piemēram, kontrolējot GEL pieļaujamās vadu temperatūru, slodzes strāvu vai nokaru robežas, kā arī izmantojot jaunas konstrukcijas augsttemperatūras vadus ar kompozītmateriāla serdeni (ar iespēju saglabāt esošos līnijas balstus).

Tālāk aplūkosim raksturīgākos virzienus esošo GEL vadībā un kontrolē, kā arī iespēju aizstāt tos ar jaunu konstrukciju augsttemperatūras vadiem.

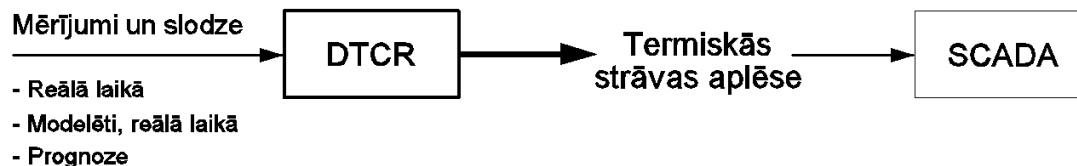
3.3.1. GEL termiskā monitoringa sistēma

Viens no kompleksajiem risinājumiem GEL pašreizējā stāvokļa operatīvai kontrolei un to reālās caurlaides spējas izmantošanas optimizēšanai ir GEL termiskā monitoringa sistēma. Pēc statistikas visvairāk pārkāpumu ET saistīts ar GEL vadu bojājumiem, ko lielā mērā nosaka elektrotīklu infrastruktūras novecošanās, jo ekspluatācijas gadu laikā dabas parādību vai īsslēguma strāvu iedarbības rezultātā vadi izstiepjās un noliecas arvien tuvāk zemes virsmai, izraisot GEL gabarītu zudumu. Tādējādi, projektējot GEL, jāievēro ne tikai tās tehniskie raksturlielumi, bet arī vada stāvokļa robežlīmeņi attiecībā pret zemi, jo GEL ģeometrija ir tiešā veidā saistīta ar tās caurlaides spēju. Vadu pagarināšanās noved pie tā saucamās termiskās degradācijas: vienos un tajos pašos LA GEL maksimāli pieļaujamo strāvu līmenis krasi krītas, līdz ar to pieaug avārijas gadījumu skaits. Tāpēc enerģētikā ir ārkārtīgi svarīgi operatīvi iegūt ziņas par katras esošās GEL pašreizējo stāvokli. Jaunās monitoringa sistēmas ieviešana ļaus praktiski tiešsaistes režīmā izsekot GEL stāvokli un līdz ar to uzrādīt tās reālo caurlaides spēju, kas ļaus operatīvi izmantot GEL „papildu” vai „rezerves” caurlaides spēju, nepārsniedzot vada pieļaujamo temperatūru, piemēram, avārijas un pēcavārijas režīmos. Šī sistēma ietvers aparātūras līdzekļu komplektu, kas piekārts uz vadiem: katrā no tiem iemontēts strāvmainis, datu bezvadu pārraides ierīce, temperatūras mērītājs un mikroprocesors – elektronikas barošanu nodrošinās strāva, kas plūst pa vadiem, bet

informācija par GEL stāvokli jāpārraida uz a/st. automātiku. Šāds risinājums ir optimāls, ja nepieciešams paaugstināt esošās GEL caurlaides spēju, jo tas ļauj saglabāt esošos vadus, nepārtraucot GEL darbību. Tomēr, saglabājot iepriekšējos vadus, jāievēro fakts, ka līdz ar to būs nepieciešama augšējās darba temperatūras izmaiņa pieļaujamās temperatūras robežās, ierobežojot vada silšanu ar vada nokari un tā novecošanās tehniskajiem nosacījumiem (standarta tipa alumīnija vadi spēj darboties temperatūrās līdz 90°C).

Izmantojot dinamisko metodi, pamatojoties uz datiem (no vada temperatūras devējiem, vides meteoroloģisko apstākļu datiem un citiem līnijas parametriem), tiek izslēgti bīstamie GEL darba režīmi. Kontrole reālā laikā pie konkrētajiem LA un vada temperatūras ļauj dispečeriem operatīvi palielināt GEL slodzi, tādējādi zināmā mērā izmainot GEL slodzes režīmu un tā operatīvo plānojumu [131].

DTCR ir programmatūra, kas sniedz reāllaika informāciju par pārvades GEL ķēdes darba stāvokli, tā palīdzot paaugstināt un optimizēt jaudas plūsmas [72]. DCTR principiālā darbības shēma parādīta 3.23. att. [52]. Programmatūra nosaka dinamiskās GEL ķēžu termiskās aplēses strāvas, izvērtējot visas iekārtu aplēses ķēdē un atrodot visierobežojošāko pieļaujamo strāvu katram aplēses scenārijam.



3.23. att. DCTR darbības princips

DTCR sistēmu ieviešanai ir nepieciešams norādīt sākotnējo darbības algoritmu, uz kura pamata iespējams izstrādāt reāllaika monitoringa sistēmu, protams, izmantojot piemērotās termiskās strāvas aplēses metodes teorētisko bāzi. Aprēķinu metodikas izvēle atkarīga no tā, kāda veida parametrus nepieciešams izmērīt vai aprēķināt, lai iegūtu vēlamu galarezultātu, tādējādi nepieciešams izveidot loģisku pasākumu ķēdi, lai atklātu izvēlētās pieejas trūkumus. Vairumā gadījumu kontroles sistēmu ieviešanai izmanto tādas termiskās strāvas aplēses metodes kā IEEE Std 786-2006, CIGRE metodi, IEC 1597 un MT 34-70-037-87 (sk. 1.2. apakšnodaļas 1.2.2. punktu). Šeit galvenā uzmanība pievērsta siltuma bilances vienādojuma (sk. izteiksmi (1.1)) svarīgākajām komponentēm, proti, siltuma pieaugumam Džoula efekta rezultātā un siltuma zudumam konvekcijas ceļā. Tādējādi ir dažādi ietekmējošie parametri, kurus nepieciešams precīzi noteikt.

Tā kā Džoula sasilšana atkarīga no vada elektriskās jaudas zudumiem tā pretestības rezultātā, nepieciešams zināt elektrisko strāvu, vada temperatūru, balstoties uz LA, kā arī aplūkojamā vada fizikālos raksturlielumus [45]. Kas attiecas uz siltuma zudumiem konvekcijas ceļā, šajā gadījumā nepieciešams noteikt vēja ātrumu (virzienu), izmantojot aplēses vai mērīšanas paņēmienus. Rezultātā pareiza iepriekšminēto parametru noteikšana paaugstinās konkrētas GEL caurlaides spējas noteikšanas precizitāti.

Pastāv dažādi veidi izvirzītā uzdevuma atrisināšanai; pirmkārt, var izmantot speciālas mērierīces, otrkārt, pastāv vairākas aprēķinu metodes, treškārt, var kombinēt pirmo un otro paņēmieni. Piemērotākā paņēmiena izvēle atkarīga no pētījumu galvenā mērķa, kā arī dažādiem apstākļiem.

Katra no termiskās strāvas aplēses metodēm balstās uz empīrisku vienādojumu kompleksu izmantošanu, kas savstarpēji saista vada temperatūru ar iepriekšminētajiem parametriem, raksturojot GEL eksploataācijas apstākļus un tās raksturlielumus.

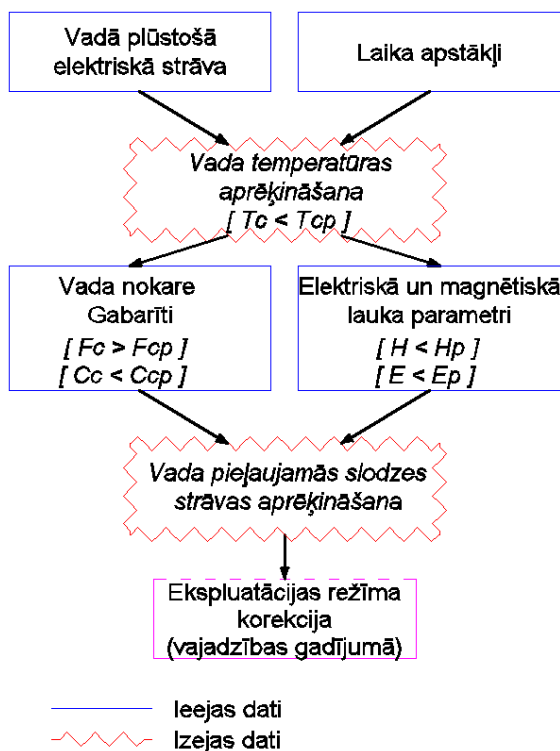
Šādas metodes koncepcija parasti balstās uz tādiem galvenajiem parametriem kā vada temperatūra, vada nokare un LA (gaisa temperatūra, vēja ātrums (virziens), gaisa mitrums, absorbcijas spēja un izstarošanas spēja), kā arī jāievēro šo parametru iedarbe uz konkrētās GEL pieļaujamo slodzes strāvu [37].

DCTR programmatūras ieviešana, kas balstās uz GEL sensoru sistēmu informāciju reāllaika darbībai, ļauj uzraudzīt GEL nokari, temperatūru un vietējos LA.

Tā kā DTCR teorētiskie principi balstās uz vairākām termiskās strāvas aplēses metodēm, jāizvēlas precīza un piemērota pieeja GEL termiskās strāvas noteikšanai, kā arī pamatparametru, piemēram, vada temperatūras, nokares noteikšanai. Pretējā gadījumā nepareizi aprēķinātā pieļaujamā strāva var izraisīt līnijas atslēgšanu un neefektīvu GEL darbību augstas vada temperatūras, kā arī palielinātas nokares gadījumos.

Līdz ar to, lai izstrādātu GEL termiskās monitoringa sistēmas sintezēto algoritmu, tika veikta GEL galveno parametru eksperimentālā pārbaude (sk. 3.1. apakšnodaļu), sniegta vairāku modeļu verifikācijas analīze, kas balstās gan uz mērījumiem, gan aprēķinos iegūtajiem rezultātiem (sk. 3.2. apakšnodaļu), tādējādi izvērtējot termiskās strāvas aplēses metožu teorētiskās bāzes validāciju. Rezultātā metode MT 34-70-037-87 tika izvēlēta par sintezētā GEL pieļaujamās slodzes strāvas algoritma pamatbāzi, kas atspoguļots 3.24. attēlā, kur T_C – vada temperatūra, T_{Cp} – pieļaujamā vada temperatūra, F_C – vada nokare, F_{Cp} – pieļaujamā vada nokare, C_C – gabarīts līdz zemei vai šķērsojamiem objektiem, C_{Cp} – pieļaujamais

gabarīts līdz zemei vai šķērsojamiem objektiem, H – aprēķinātā ML intensitāte, H_p – pieļaujamā ML intensitāte, E – aprēķinātā EL intensitāte, E_p – pieļaujamā EL intensitāte [42].



3.24. att. Termiskās monitoringa sistēmas sintezētā algoritma koncepcija

Sintezētā GEL pieļaujamās slodzes strāvas monitoringa algoritma darba procesu var atainot četros pamatposmos (sk. 3.24. att.):

- I. Zinot vadā plūstošo elektrisku strāvu un LA, var aprēķināt vai izmērīt vada temperatūru; protams, tā nedrīkst pārsniegt vada pieļaujamās temperatūras vērtību, kuru nosaka vada fizikālie raksturlielumi (jāievēro vada ražotāja tehniskā dokumentācija);
- II. Nosakot vada temperatūru, nepieciešams aprēķināt vada nokari un gabarītus līdz zemei vai šķērsojamajiem objektiem, kā arī pārbaudīt EL un ML parametrus, kuriem tāpat jābūt pieļaujamo normatīvo vērtību robežās;
- III. Ievērojot iepriekšminētos parametrus, var noteikt pētāmā vada pieļaujamo slodzes strāvu;
- IV. Vajadzības gadījumā jāveic GEL darba režīma korekcija.

3.3.2. Esošo GEL vadu nomaīņa

Elektroenerģētiskās sistēmas veidojas un darbojas tā, lai nodrošinātu drošu saikni starp elektroenerģiju ražojošajām elektrostacijām un vietējām vai sadales apakšstacijām. Laika periodos, kad darba slodze sasniedz maksimālās vērtības un gadījumos, kad kāda no sistēmas

sastāvdaļām nedarbojas, GEL ir jānodrošina nepieciešamais elektroenerģijas pārvades palielinājums, neradot pārmērīgu spriegumu fāzu nobīdi līniju galos, sprieguma kritumu līnijās un augstu līniju vadu temperatūru. Tajā pašā laikā periodos, kad LA ir ekstremāli, līnijām jāiztur apledojuuma un vēja slodzes bez jebkādiem mehāniskajiem un elektriskajiem bojājumiem.

Pašlaik pastāv iespēja aizstāt esošo GEL ACSR tipa vadus ar jaunu konstrukciju HTLS tipa vadiem, jo lielākā daļa no visām esošajām ACSR tipa vadiem, kas šobrīd atrodas ekspluatācijā, ir fiziski un morāli novecojuši to ilga kalpošanas laika rezultātā. Līdz ar to, gadījumos, kad nepieciešams palielināt esošās GEL caurlaides spēju jeb uzlabot GEL nepietiekamus gabarītus, tas var būt efektīvi optimāls risinājums ar minimālām izmaksām (esošās GEL rekonstrukcija prasa mazākas investīcijas nekā jaunas GEL būve), jo optimizētiem augsttemperatūras vadiem piemīt virkne priekšrocību. Pēdējā laikā šis augstsprieguma elektrolīniju optimizācijas paņēmieni ir viens no visvairāk diskutējamām problēmām, veicot mūsdienu energosistēmu modernizāciju [114, 95].

Galvenie kritēriji, pēc kādiem salīdzina tradicionālos ACSR vadus ar HTLS vadiem, ir to tehniskās un komerciālās priekšrocības [68]. Izšķir šādas HTLS tipa vadu tehniskās priekšrocības salīdzinājumā ar ACSR tipa vadiem:

- 1) Izmantojot HTLS tipa vadus, iespējams izvairīties no balstu nomaiņas un jaunu GEL celtniecības. Turklāt mazākas nokares dēļ aprēķina laidums kļūst lielāks, kas samazina kopējo balstu skaitu;
- 2) Iespējams nodrošināt pārvadāmās jaudas rezervi nākotnes perspektīvai, ņemot vērā pasaules un valsts enerģētikas attīstības pamatnostādnes;
- 3) Ja nepieciešams palielināt pārvadāmās jaudas – mazākas papildu elementu izmaksas, piemēram, saistībā ar augstāku balstu uzstādīšanu (jau tikai nomainot vadu, iespējams paaugstināt līnijas caurlaides spēju divas reizes);
- 4) Kompozītmateriāla serdenis ir izturīgs pret koroziju, kas ievērojami samazina ekspluatācijas izmaksas;
- 5) Mazāki pārvades zudumi, kas ļauj pārvadīt lielāku jaudu, gūt lielāku peļņu un samazināt negatīvo ietekmi uz vidi.

Izšķir šādas HTLS tipa vadu komerciālās priekšrocības salīdzinājumā ar ACSR tipa vadiem:

- 1) Nodrošina divreiz lielāku pārvadāmo jaudu salīdzinājumā ar tāda paša diametra parasto ACSR vadu;
- 2) Kompozīta serdeņa zemais termiskās izplešanās koeficients atrisina nokares problēmu. Vadu var izmantot augstākās temperatūrās, jo nominālā darba temperatūra ir no 180°C (ACCC) līdz pat 200°C (ACCR);
- 3) HTLS tipa vadiem ir mazāka pretestība, tādēļ pie vienādas strāvas tie mazāk sasilst, kas ļauj līdz minimumam samazināt zudumus GEL;
- 4) Serdenis ir izturīgs pret ķīmisko un bimetālisko koroziju, kas nodrošina vadam ilgāku darbību;
- 5) Viegli montējami – uzstādīšanai un savienošanai ar citām līnijām nav vajadzīgas papildu zināšanas, ierīces vai instrumenti.

Apkopojot izklāstīto, var secināt, ka viena no būtiskām tehniskām priekšrocībām vadiem ar kompozītmateriālu serdeni ir spēja palielināt GEL caurlaides spēju, tādējādi nodrošinot papildu jaudas rezervi gan darba režīmā, gan pieslēdzot jaunus perspektīvos patērētājus. Kas attiecas uz ekonomisko priekšrocību, tad šajā gadījumā var minēt HTLS tipa vadu mehānisko izturību, tādējādi palielinot vada darbību, kas savukārt samazina GEL kopējās ekspluatācijas izmaksas. Lietderīgi piebilst, ka, izvēloties šādas konstrukcijas vadus esošas GEL rekonstrukcijai, obligāti jāizvērtē arī tās pastāvošās līnijas armatūras izmantošanas iespējas darba un avārijas režīmos, lai arī armatūra varētu izturēt papildu termisko slodzi.

Lai varētu detalizētāk izvērtēt vadus ar kompozītmateriāla serdeni un to izmantošanas iespējas, tika izdarīti vairāki tehniskie un ekonomiskie salīdzinājumi ar ACSR tipa vadiem, balstoties gan uz „Kurzemes loka” projektu (1. posms), kas iekļauj 330/110 kV GEL, gan uz esošajiem GEL piemēriem (sk. 4.2. apakšnodaļu).

3.4. Secinājumi

1. GEL pašreizējās strāvu aplēses pieejas ir samērā konservatīvas, jo tās balstās uz visnelabvēlīgāko gadījumu, kas reāli neparāda apkārtējās vides klimatisko parametru un vadu temperatūras faktiskās vērtības, kā rezultātā rodas nepilnības pastāvošo termiskās strāvas aplēses metožu precizitātē.

2. Veicot GEL nepieciešamo ievades parametru (vada temperatūras, GEL strāvas, sprieguma, nokares) mērījumus vairākos GEL darbības režīmos pie dažādiem Latvijas vides klimatiskajiem apstākļiem (gaisa temperatūras, vēja ātruma), iespējams izvēlēties vispiemērotāko termiskās strāvas aplēses metodes teorētisko bāzi.
3. Piedāvātais GEL strāvas monitoringa sistēmas sintezētais algoritms ļauj uzlabot strāvas noteikšanas precizitāti esošām vai projektējamām GEL, kā arī noteikt slodzes strāvas rezervi, ievērojot termiskos, mehāniskos un vides ierobežojumus.
4. Faktiskās vadu temperatūras un reālo LA datu izmantošana ļautu regulēt GEL slodzes strāvu elastīgākā veidā, pielāgojoties dinamiski operatīvai elektroliņiju kontrolei un vadībai reāllaika režīmā un sniedzot jaunas iespējas viedā tīkla integrēšanai.
5. Apstiprinot izmantotā sintezētā algoritma tehnisko efektivitāti dažādu problēmu izskatīšanai, rezultātā samazinās kopējo investīciju apjoms GEL rekonstrukcijā, kas ir ekonomiski pamatots risinājums.
6. Pamatojoties uz darbā iegūtajiem rezultātiem, var konstatēt, ka, pirms tiek izvēlēta piemērotākā GEL termiskās strāvas aplēses metode, uz kuras pamata var attīstīt un izstrādāt reāllaika termiskās strāvas monitoringa sistēmu, nepieciešams rūpīgi izpētīt izvēlētas metodes teorētisko bāzi līdz pat eksperimentālu mērījumu veikšanai, kas var balstīties uz vienkāršotām monitoringa iekārtām.

4. GEL PROJEKTĒŠANAS PIEMĒRI UN REZULTĀTI

4.1. Projekts „Kurzemes loks”

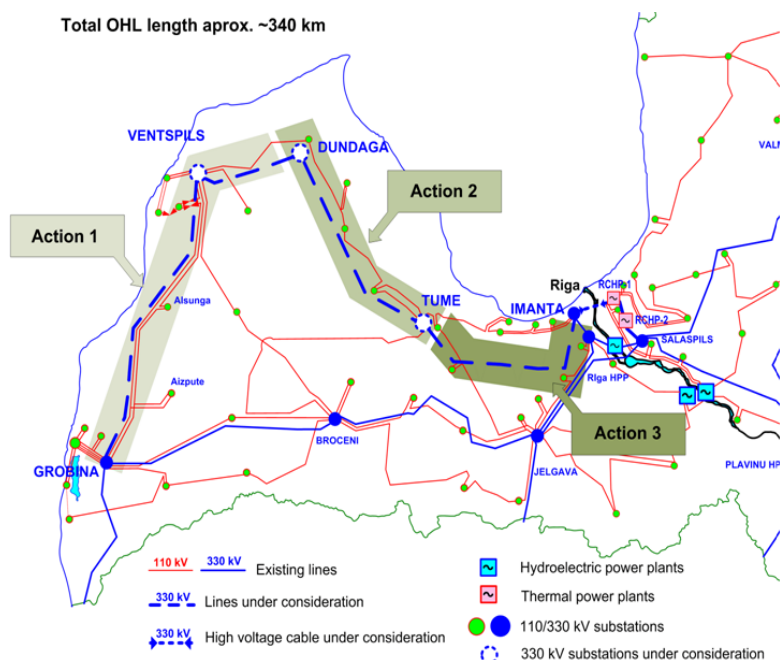
4.1.1. Ievads

„Kurzemes loks” (KL) ir pirmais atjaunotās Latvijas Republikas laikā uzsāktais, valstij stratēģiski svarīgs pārvades sistēmas infrastruktūras projekts, kuram ir noteikts nacionālo interešu objekta statuss, kas piešķir objektam ne tikai tiesisko statusu būvniecības laikā, bet arī uzlabo starpinstitutionu sadarbību ar pašvaldībām, sekmē valsts, kā arī telpiskās un reģionālās plānošanas pašvaldības attīstību. KL ir daļa no kopēja Eiropas Savienības (ES) līdzfinansētā BEMIP (*Baltic Interconnection Plan*) plāna lielākā Baltijas energopārvades drošības stiprināšanas projektā – NordBalt, kura realizācijas ietvaros paredzēta Lietuvas – Zviedrijas starpsavienojuma izbūve (zemūdens kabelis), kā arī Latvijas un Lietuvas pārvades tīkla pastiprināšana, lai uzlabotu visas Baltijas energoapgādes drošumu, palielinātu to starpsavienojuma jaudas tranzītu un attīstītu nepieciešamo iztrūkstošo pārvades jaudu infrastruktūru Latvijā. Starptautiskā energoinfrastruktūras attīstības projekta realizācijas rezultātā tiks attīstīts Baltijas elektroenerģijas tirgus, nodrošinot elektroenerģijas pirkšanas, pārdošanas un tranzīta iespējas ar citām ES valstīm (sk. 4.1. att.). Būtiski piezīmēt, ka KL izbūvēšana nodrošinās pietiekamu Kurzemes reģiona (KR) elektroapgādes drošumu, tādējādi samazinot avāriju rašanās iespēju pārvades sistēmā, kā arī palielināsies operatīvās avāriju novēršanas iespējas, ievērojot jaunu elektroenerģijas lietotāju elektroietaišu pieslēgšanas potenciālu [10].

KL projektu plānots realizēt trijos posmos (sk. 4.1. att.) [10]:

- 1) paredzēts nodrošināt 330/110 kV gaisvadu elektropārvades līnijas Grobiņa – Ventspils izbūvi. Projektēšanas fāze uzsākta jau 2010. gadā, bet visus darbus plānots noslēgt 2013. gada 31. decembrī;
- 2) paredzēts noslēgt KL izbūvi ar posmu Dundaga – Tume – Imanta;
- 3) paredzēts izbūvēt 330 kV kabeli, savienojot Rīgas TEC-2 ar apakšstaciju „Imanta”, tādējādi likvidējot elektriskā savienojuma „šauru vietu” starp Latvijas centru un rietumu daļu, kas atsevišķos gadījumos nepietiekamās caurlaides spējas dēļ ierobežo elektroenerģijas apjoma tranzīta plūsmas. Rezultātā tiek pastiprināta Rīgas elektroapgādes stabilitāte, kā arī nodrošināts stabilāks Latvijas centrālās daļas tīklu un ģenerācijas avotu pieslēgums KL.

Kopējo KL projektu plānots pabeigt 2018. gada beigās.



4.1. att. Projekta „Kurzemes loks” plāns

4.1.2. Projekta KL tehniskais pamatojums

Kurzemes reģiona, it īpaši Ventspils pilsētas, elektroapgāde ir viena no pārvades elektrotīkla (PT) „šaurajām vietām”. Tuvākajos gados šajā reģionā ir prognozētas ievērojamas pārmaiņas gan pieslēgto ģenerējošo jaudu struktūrā, gan jaunu starpsavienojumu izveidošanas ziņā, piemēram, sagaidāma Kurzemes KES un vēja parku būvniecība Rietumu piekrastē, kā arī plānota jaunu starpsistēmu savienojumu būvniecība no Baltijas uz Zviedriju un Somiju. Līdz ar to esošajai elektropārvades tīkla caurlaides spējai jābūt pietiekamai, lai nodrošinātu pieprasītus energosistēmas režīmus: normālo darba režīmu un plānotā remonta režīmu pie ziemas un vasaras maksimālās slodzes režīmiem. Tā rezultātā, lai nodrošinātu minētos darba režīmus, nepieciešams paredzēt atbilstošus tehniskos pasākumus: esošo iekārtu caurlaides spējas palielināšanu un jaunu pārvades sistēmas iekārtu būvniecību.

Turklāt jāievēro arī tāds aspekts, ka Latvijas rietumdaļā ir vislielākais vēja potenciāls valstī un ir vērojama investoru interese apgūt šo atjaunojamo energoresursu veidu. Latvijas pārvades sistēmas operatoram (PSO) ir iesniegts liels vēja elektrostaciju izbūves tehnisko noteikumu pieprasījumu skaits Kurzemē, gan uz zemes, gan jūrā (līdz 2000 MW). Pie esošā 110 kV PT Kurzemes piekrastē iespējams pieslēgt tikai ierobežotu vēja elektrostaciju jaudu (līdz 220 MW), kura aprēķināta, ievērojot EPT caurlaides tehniskās iespējas. Tiek apspriesta

arī cietā kurināmā elektrostacijas būvniecība Liepājā vai Ventspilī, kas tiks pieslēgta pie plānotā 330 kV KL [10].

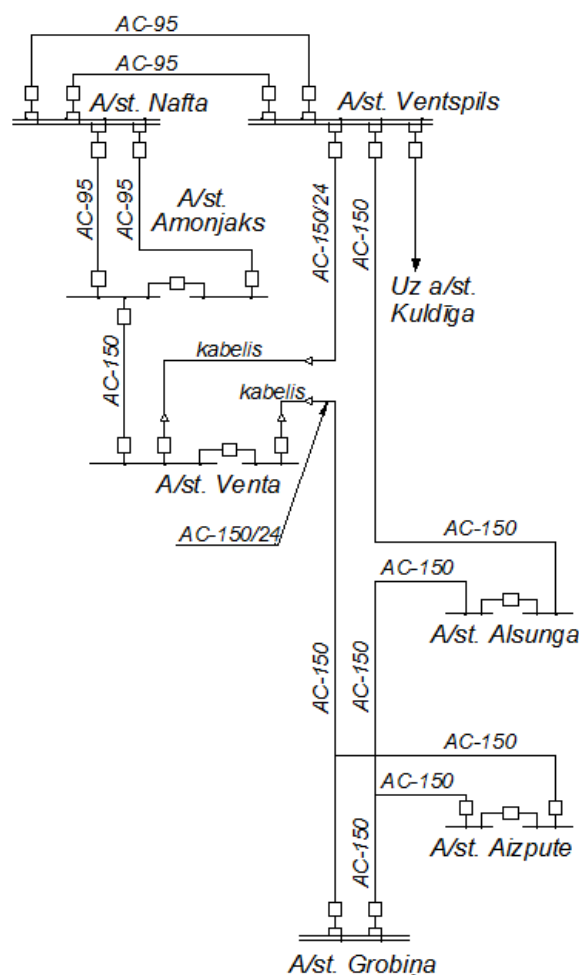
Būtiski pieminēt, ka Latvijas energosistēmai, darbojoties sinhroni ar citu valstu energosistēmām, jārēķinās ar tīkla darbības traucējumiem, kurus izraisa avārijas kaimiņu energosistēmās, piemēram, Lietuvā, Krievijā (Kaļiņingradas TEC), kas ietekmē jaudas tranzītu visā tīklā. Turklāt līdz 2014. gadam plānota Igaunijas – Somijas 2. starpsavienojuma Estlink2 izbūve jūras kabeļa izpildījumā, kā arī līdz 2018. gadam plānota Lietuvas – Zviedrijas starpsavienojuma jūras kabeļa izbūve. Kurzemes 330 kV tīkls ir šo abu starpsavienojumu neatņemama sastāvdaļa. Jaunizveidotie starpsavienojumi ievērojami uzlabos visa Baltijas reģiona elektroapgādes drošumu GEL normālā darba un remonta režīmā, kā arī avārijas gadījumos.

Līdz 2015. gadam Baltijas valstīs plānots pilnībā atvērt elektroenerģijas tirgu. Līdz ar to nepieciešams izveidot pietiekami stipru un drošu tranzīta koridoru, kur plānotais Kurzemes 330 kV tīkls spēs pārvadīt ievērojamu daļu tranzīta enerģijas, veicinot elektroenerģijas tirdzniecības paplašināšanos [10].

Esošais 110 kV PT nenodrošina pietiekamu KR un pilsētu patērētāju elektroapgādes drošumu, jo aplūkojamais reģions atrodas III un IV vēja spiediena zonā, kas var kļūt par galveno avārijas atslēgumu iemeslu. Turklāt 330 kV PT nodrošina esošo jaudas pieprasījumu atsevišķos energosistēmas remonta režīmos bez speciāliem ierobežojumiem, kā arī elektroenerģijas jaudu pieprasījuma pieaugumu nākamajā desmitgadē, attīstoties tautsaimniecībai Kurzemes reģionā. Pašreiz KR lielākie elektroenerģijas patērētāji ir AS „Venta Amonjaks”, AS „Ventspils nafta”, AS „Liepājas Metalurgs”, AS „Brocēni”, SIA „Cemex” u.c., tuvākajā laikā ir plānota AS „Liepājas Metalurgs” paplašināšanās. Pie tam nav izslēgts, ka nākotnē parādīsies citi lielas jaudas patērētāji, piemēram, saules paneļu silīcija un katodu bloku ražotnes Liepājā [10].

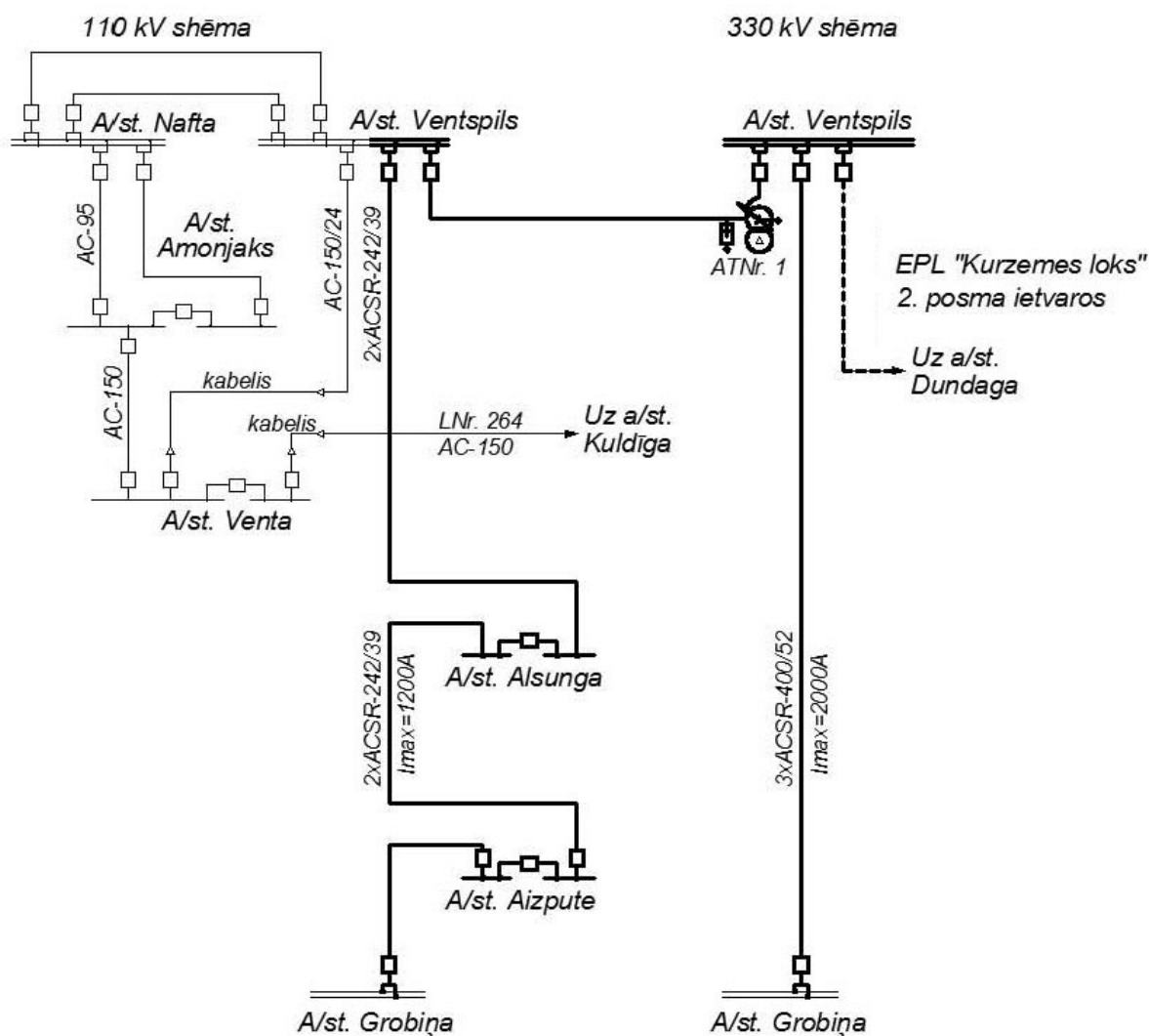
EPL posma Grobiņa – Ventspils pārbūves pamatojums ir Latvijas rietumu reģiona EPT perspektīvā attīstība, kuras koncepcija izstrādāta 2009. gadā, ko veikusi AS „Latvenergo” izpētes un attīstības institūcija (sk. 1.4. un 1.5. att.). Attīstības gaitā jāveic a/st. „Ventspils” rekonstrukcija ar 330 kV sadales izbūvi un a/st. “Grobiņa” 330 kV sadales paplašināšanu, kas ir svarīgs mezgls Liepājas rajonam, kā arī Latvijai un Baltijai. Turklāt paredzēta a/st. „Alsunga” un „Aizpute” rekonstrukcija atsevišķu tehnisko projektu veidā.

Elektrisko tīklu esošā 110 kV principiālā elektriskā shēma parādīta 4.2. att.; kā redzams, pašreizējā situācijā Ventspils pilsēta un tās reģions saņem elektroenerģiju pa trijām 110 kV pamatlīnijām: pa divķēžu 110 kV elektropārvades līniju no Grobiņas, no Tukuma un no Brocēniem. Esošo elektrolīniju posmi ir fiziski un morāli novecojuši, ar nepietiekošu caurlaides spēju, kā arī pieļaujamā sprieguma līmeņa uzturēšana pēc drošuma kritērija „n-1” jau pašreizējā situācijā rada problēmas. Līdz ar to šīs līnijas izmantošana nevar garantēt drošu Ventspils pilsētas elektroapgādi jau tagad, bet it īpaši perspektīvā. Turklāt Kurzemes zonā plānots uzstādīt lielas jaudas (30 – 80 MW) vēja parkus. Tā rezultātā Latvijas valsts KR attīstība rada nepieciešamību pēc jaunu jaudīgu elektrolīniju, jaunu apakšstaciju celtniecības un esošo apakšstaciju paplašināšanas vai rekonstrukcijas.



4.2. att. Esošā 110 kV principiālā elektriskā shēma

Tā kā KR esošais 110 kV elektrotīkls nevar nodrošināt atbilstoša līmeņa elektroapgādi, pieņemts lēmums izveidot 330 un 110 kV EPT savienojumu „Kurzemes Loks”. 110 kV un 330 kV principiālās elektrisko tīklu shēmas pēc rekonstrukcijas sk. 4.3. att.



4.3. att. 110 kV un 330 kV principiālās elektriskās shēmas pēc rekonstrukcijas

Projektā paredzēts savienot a/st. „Grobiņa” un a/st. „Ventspils” (330 kV a/st. „Ventspils” izbūve un a/st. „Grobiņa” paplašināšana tiks veikta atsevišķu projektu ietvaros) ar 330/110 kV gaisvadu EPL uz kopējiem divķēžu balstiem (pamatlīnija). Līnijas garums ir aptuveni 118 km. Vienlaicīgi paredzēts rekonstruēt 110 kV EPL nozarojumus uz a/st. „Aizpute” (līnijas garums – 6,7 km) un uz a/st. „Alsunga” (līnijas garums – 3,6 km). KL izveidošanā ietilpst jaunu 330 kV elektropārvades līniju Liepāja (Grobiņa) – Ventspils – Dundaga – Tukums (Tume) – Rīga izbūve, tomēr šajā promocijas darbā tiks izskatīts tikai 1. posms (t.s. „action 1”) (sk. 4.1. att.), kas šobrīd (2013. g.) jau tiek daļēji realizēts. Tas nozīmē, ka tiks rekonstruēta 110 kV GEL, pastiprinot to ar 330 kV EPL. Jauno 330 kV EPL paredzēts izbūvēt pa esošo 110 kV EPL trasi, kas maksimāli ļauj izmantot esošās trases pielāgotību paredzētajai darbībai un ievērojami samazināt papildu zemes apgrūtinājumus.

4.1.3. Projekta izejas dati, galvenie parametri un konstrukcijas

4.1.3.1. Projektēšanas klimatiskie apstākļi

Klimatisko apstākļu aprēķini (ieskaitot vēja zonas raksturlielumus) veikti saskaņā ar [102] standarta prasībām, ievērojot pērkonu negaisa intensitātes rādītājus. Atbilstoši KL projektēšanas uzdevumam izšķir šādas GEL vēja zonas:

- ✓ no a/st. "Grobiņa" līdz esošās LNr. 266 balstam Nr. 466 (jaunās GEL balsts Nr. 13), ieskaitot nozarojumus uz a/st. „Aizpute” un „Alsunga”: vēja normatīvais (atsauces) ātrums $V_r = 21$ m/s (atbilstoši maksimālajam (brāzmu) vēja ātrumam 31,9 m/s un maksimālajam brāzmu vēja spiedienam 656 N/m^2 , kas noteikts 15 metru augstumā);
- ✓ no a/st. "Ventpils" līdz esošās LNr. 266 balstam Nr. 466 (jaunās GEL balsts Nr. 13): vēja ātrums $V_r = 24,6$ m/s (atbilstoši maksimālajam (brāzmu) vēja ātrumam 37,3 m/s un maksimālajam brāzmu vēja spiedienam 900 N/m^2 , kas noteikts 15 metru augstumā).

Apledojuma sienīgas biezums 10 mm, atkārtojoties 1 reizi 10 gados.

Vispārīga gadījumā vēja spiediens un apledojuma sienīgas biezums jāpieņem pēc spēkā esošajiem normatīviem, Latvijā jāpiemēro būvnormatīvs LBN 003-01 "Būvklimatoloģija" [201].

Maksimālā gaisa temperatūra: $+35^\circ\text{C}$; minimālā gaisa temperatūra: -35°C ; gada vidējā ekspluatācijas gaisa temperatūra: $+5^\circ\text{C}$.

Zibens darbības vidējais ilgums gadā: 40 stundas.

4.1.3.2. Vadi un aizsargtroles

Augstsprieguma pamatlīnijā 330 kV pusē paredzēts piekārt ACSR 402/52 tēraudalumīnija vadus ar strāvas caurlaides spēju 2000 A, savukārt 110 kV pusē – ACSR 242/39 ar strāvas caurlaides spēju 1200 A (tai skaitā 110 kV nozarojumi uz a/st. „Aizpute” un „Alsunga”).

Aizsardzība no zibens pārspriegumiem paredzēta ar divām trosēm: viena aizsardzības trose – tērauda vads, otra aizsardzības trose – alumīnija sakausējuma vads ar iebūvētu optisko šķiedru kabeli (OPGW). 110 kV nozarojumi uz a/st. “Aizpute” un “Alsunga” aizsargāti no zibens iedarbības ar vienu OPGW trosi. 330/110 kV EPL balstiem zibensaizsardzības trose un OPGW trose piestiprināta ar izolētiem stiprinājumiem, stiprinājumā izolators šuntēts ar dzirksteļspraugu. Izolētajos zibensaizsardzības trošu stiprinājumos izmantoti stikla izolatori.

Lai ierobežotu strāvu un spriegumu nesimetriju, GEL izbūvē paredzēts viens pilns elektrolīnijas transpozīcijas cikls.

4.1.3.3. Līniju armatūra

330 un 110 kV EPL virtenes komplektētas ar stienveida polimēra izolatoriem:

- ✓ enkurbalstiem paredzēts izmantot divķēžu atsējvirtenes (sk. 7. pielikumu);
- ✓ starpbalstiem – vienķēdes un divķēžu piekarvirtenes (sk. 8. pielikumu).

4.1.3.4. Balsti un pamati

330/110 kV EPL (pamatlīnijai), ieskaitot 110 kV GEL nozarojumus uz a/st. „Alsunga” un „Aizpute”, paredzēts uzstādīt dažāda tipa tērauda konstrukciju enkurbalstus un starpbalstus (sk. 9. pielikumu), piemērojot katram atsevišķam balstam atbilstošu balsta augstumu un traversas tipu atkarībā no GEL trases pagriezienu leņķa. Balsti projektēti atbilstoši CENELEC standartam [50] un elektrolīnijas projektēšanas klimatiskajiem apstākļiem.

Pamatlīnijai starpbalstu apakšējās traversas augstums ir 20 m, 22 m un 24 m ar leņķiem līdz 3°. Aprēķina laidums šāda tipa balstiem ir 300 – 370 m, maksimālais vēja laidums 370 m, svara laidums 400 m. Enkurbalstu apakšējās traversas augstums ir 16 m, 19 m, 22 m un 25 m. Šeit izšķir trīs enkurbalsta tipus: ar leņķiem līdz 20° un ar leņķiem līdz 60°, kas projektēti tā, lai izturētu piekāršanas slodzes vienā balsta pusē, bet tos nevar izmantot par gala balstiem; un balsti ar leņķiem līdz 90°, kas projektēti tā, lai izturētu piekāršanas slodzes vienā balsta pusē, un tos var izmantot par gala balstiem (ievērojot, ka maksimālais līnijas leņķis no līnijas sānu ass ir 15°). Aprēķina laidums šāda tipa balstiem ir 300-370 m, maksimālais vēja laidums 370 m; svara laidums 400 m.

110 kV GEL nozarojumus uz a/st. „Alsunga” un „Aizpute” paredzēts uzstādīt starpbalstus ar apakšējās traversas augstumu 16 m, 18 m, 20 m, 22 m, 24 m un 26 m ar leņķiem līdz 3°. Aprēķina laidums šāda tipa balstiem ir 300 – 370 m, maksimālais vēja laidums 370 m ($V_r = 21$ m/s) un 300 m ($V_r = 24,6$ m/s); svara laidums 400 m. Enkurbalstu apakšējās traversas augstums ir 11 m, 16 m, 20,6 m, 23 m un 26 m. Šeit izšķir divus enkurbalsta tipus: ar leņķiem no 20° un līdz 60° (pieņem to kā starpbalstu vai stūra balstu) un ar leņķiem, kas nepārsniedz 30° (pieņem to kā starpbalstu vai gala balstu). Aprēķina laidums šāda tipa balstiem ir 250-350 m, maksimālais vēja laidums 350 m; svara laidums 380 m.

Visi balsti projektēti tā, lai izturētu slodzes no ACSR vadiem 3x2-ACSR402/52 (330 kV) un 3x2-ACSR 242/39 (110 kV), kā arī no zibensaizsardzības trosēm (OPGW vai tērauda vads).

Visi GEL balsti tiek sazemēti ar balstu zemēšanas ietaišu izveidi. Balstu zemējuma ietaises tiek izgatavotas no apaļtērauda, Ø16 mm (vertikālie elektrodi) un no slokšņu tērauda 40x4 mm (zemējuma kontūrs un stari).

Balstiem paredzēti divi pamatu konstrukciju veidi: saliekamo dzelzsbetona konstrukciju pamatu izbūve uz dabīgās grunts pamatnes un monolītu dzelzsbetona pamatu (režģotu) izbūve ar pāļu pamatnēm.

4.2. Augsttemperatūras vadu izmantošanas perspektīvas un iespējas

Šajā apakšnodaļā tiks aplūkoti un analizēti HTLS un ACSR tipa vadu tehniskajā un ekonomiskajā salīdzinājumā iegūtie rezultāti GEL piemēriem, kas balstās uz:

- 1) „Kurzemes loka” projekta 1. posma izejas datiem, piemēram, nozarojuma uz a/st. „Aizpute” 110 kV GEL projektu (sk. 4.2. apakšnodaļas 4.2.1. punktu) [35], savukārt pārējo izskatīto GEL piemēru aprēķina rezultātu analīzi var aplūkot [31, 39] – 330/110 kV pamatlīnijai (KL priekšprojekta ietvaros); [40] – nozarojuma uz a/st. „Alsunga” 110 kV GEL projektu;
- 2) esošo Latvijas EPT GEL izejas datiem, piemēram, LNr. 355 (sk. 4.2. apakšnodaļas 4.2.2. punktu) un LNr. 309 [41].

4.2.1. GEL aprēķina piemērs, kas balstās uz nozarojuma uz a/st. „Aizpute” 110 kV EPL projektu, kas iekļauts „Kurzemes loka” projekta 1. posmā

4.2.1.1. Izejas dati un aprēķina nosacījumi

KL projekta 1. posma 330/110 kV EPL celtniecība tiks realizēta Latvijas rietumu daļā, kur izvēlētais rajons ir interesants tādā ziņā, ka tas atrodas Baltijas jūras krasta tuvumā, kur novērojamas Baltijas valstīm raksturīgās klimatisko apstākļu kombinācijas (paaugstināts vēja spiediens, pastiprināta vadu un trošu apledošana un apsarmošana).

Novērtēšanas nolūkiem izvēlēta dabā pastāvoša GEL LNr. 266A trase, kas ietilpst Latvijas EPT, un tās garums ir 6,7 km (sk. 4. pielikumu). Savukārt izskatāmā GEL piemēra aplūkojamo vadu tehniskā un ekonomiskā salīdzinājuma koncepcija balstās uz „Kurzemes loka” priekšprojekta 1. posma versiju. Tas nozīmē, ka GEL balstu un vadu tipi izvēlēti atbilstoši priekšprojekta versijas tehniskās specifikācijas (TS) prasībām, bet ar dažiem pieņēmumiem:

- 1) tā kā izvēlētās esošās GEL trases garums – 6,7 km – ir pārāk mazs, lai pēc iespējas maksimāli novērtētu iegūto rezultātu efektivitāti, nosacīti pieņemta 50 km gara 110 kV vienķēdes GEL;
- 2) saskaņā ar projekta TS jaunajai līnijai LNr. 266 jāpārvada strāva, kas ir ne mazāka par 1200 A 110 kV ķēdei, taču šajā uzdevumā maksimālā strāva pieņemta vienāda ar 850 A, pamatojot šādu izvēli ar to, ka GEL darbība pie 1200 A strāvas Latvijas klimatiskajos apstākļos var notikt pie maksimālās gaisa temperatūras +35°C, kuras rašanas varbūtība ir ļoti zema;
- 3) GEL LNr. 266A esošais vads ir *AS-95/16*, bet jaunajai EPL LNr. 266 (šobrīd jau izbūvētai) paredzēts piekārt ACSR tipa vadu *242-AL1/39-ST1A*, tādēļ aplūkojamajā pētījumā vadu tips izvēlēts jau atbilstoši jaunajam vadam *242-AL1/39-ST1A*.

GEL trases reģionā pieņemtie klimatiskie apstākļi atbilst KL projektēšanas uzdevuma izejas datiem (sk. 4.1. apakšnodaļas 4.1.3. punktu), papildus pieņemot, ka vada maksimālā temperatūra ir +70 °C, kas ir pieļaujams no ACSR vada mehāniskās izturības viedokļa.

Salīdzinošie aprēķini veikti gan pēc izvēlēto vadu tehniskā aspekta – pēc to mehāniskajiem ierobežojumiem (pieļaujamais maksimālais ($\sigma_{\max}$), minimālais ($\sigma_{\min}$) un ekspluatācijas ($\sigma_{\text{eksp.}}$) mehāniskais spriegums vadā; vēja, svara un gabarīta laidumi; vada nokares), pēc termiskajiem ierobežojumiem (GEL caurlaides spēja; vada pieļaujamās temperatūras); gan pēc ekonomiskā aspekta (ietaupījums uz starpbalstu skaita rēķina, kopējo nepieciešamo materiālu un aprīkojuma izmaksu aprēķins), pamatojoties uz atbilstoša GEL piemēra izejas datiem – GEL projektēšanas klimatiskajiem apstākļiem (vēja ātrums; apledošanas sieniņas biezums; maksimālā, minimālā un ekspluatācijas temperatūra, kas piemīt izvēlētajam GEL trases reģionam), īpatnējiem konstruktīvajiem parametriem (aprēķina laiduma garums; gabarīts līdz zemei vai šķērsojamiem objektiem), nepieciešamajām konstrukcijām (vadi un aizsargtrošes, līnijas armatūra, balsti un pamati) un aprēķina nosacījumiem, ievērojot spēkā esošos normatīvus.

Par 110 kV GEL balstiem tika izvēlēti S110-2 tipa betona starpbalsti un AT110-2 enkurbalsti (sk. 10. pielikumu).

Jaunajai GEL LNr. 266 tika izvēlēts *242-AL1/39-ST1A* vads (ACSR) un salīdzināšanas nolūkiem uzdevuma nostādnes ietvaros atbilstoši izvēlētajam jaunajam vadam papildus pieņēma trīs HTLS tipa vadus – *Glasgow* un *Casablanca* (ACCC) un *Hawk 477* (ACCR), kā arī vienu tradicionālā tipa vadu *AS-240/32*, kuru tehniskie dati sniegti 4.1. tabulā. Aplūkotie

vadi tika izvēlēti, ievērojot galveno tehnisko parametru – vada alumīnija daļas šķērsgriezuma laukumu un tā aktīvo pretestību. HTLS tipa vadu raksturojums un apskats sniegts 1.3. apakšnodaļas 1.3.2.4. punktā.

4.1. tabula

GEL LNr. 266 un LNr. 309 pētīto vadu tehniskie dati

Vadu fizikālās īpašības	Apzīmējums	Mērvienība	AS-240/32	242-AL1/39-ST1A	Glas-gow	Casa-blanca	Hawk 477
Vada diametrs	d	mm	21,6	21,8	19,5	20,5	21,6
Vada šķērsgriezums	s	mm ²	275,7	282,5	284,4	309,7	277
Vada elastības modulis	E	kg/mm ²	7700	7849	7640	7450	7800
Lineārās izplešanās koeficients	α	1 /°C	19,8/ 10 ⁶	19,0/ 10 ⁶	17,5/ 10 ⁶	18,6/ 10 ⁶	16,7/ 10 ⁶
Vada lineārā slodze	P1	kg/m	0,92	0,98	0,74	0,82	0,79
Vada reducētā īpatnējā slodze	Y1	kg/m·mm ²	3,34/ 10 ³	3,47/ 10 ³	2,61/ 10 ³	2,66/ 10 ³	2,86/ 10 ³
Vadu skaits fāzē LNr.-266	N	gab.	2	2	1	1	1
Vadu skaits fāzē LNr.-309	N	gab.	2	-	1	1	1

Galvenais uzdevums šajā pētījumā bija, zinot nepieciešamo uzstādīto pārvadāmo strāvu (850 A), noteikt, kurš no aplūkojamajiem vadiem ir optimālais GEL projektēšanas variants pēc izvēlētajiem aprēķina nosacījuma kritērijiem.

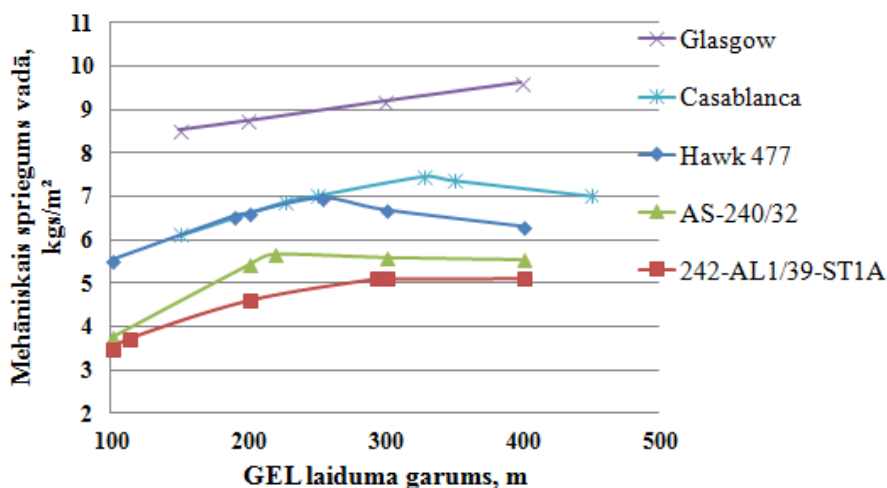
4.2.1.2. Vadu tehniskā salīdzinājuma rezultāti

Iegūtie aprēķina rezultāti balstās uz iepriekšminētajiem klimatiskajiem apstākļiem, kā arī balsta un vadu aprēķina sākumdatu izvēles nosacījumiem. Aprēķina rezultātu apkopojums pēc mehāniskajiem ierobežojumiem atspoguļots 4.4. ÷ 4.8. attēlā.

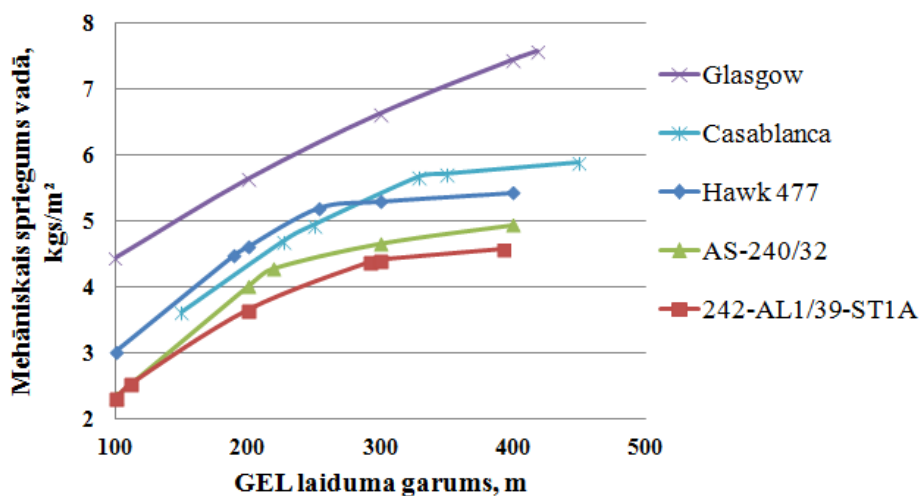
Šajā uzdevumā tika analizēti divi izvēlēto vadu tipu sasilšanas režīmi – vada sasilšana līdz +35°C un līdz +70°C, kas iegūti pēc atbilstošā vada sistematiskā aprēķina. Lai veiktu aplūkojamo vadu sistematisko aprēķinu un noteiktu balstu izvietojumu uz reāla esošas līnijas profila, tika izmantota specializētā GEL projektēšanas programma *SAPR LEP* (sk., piemēram, 11. pielikumu) [110]. Kas attiecas uz vadu aprēķina metodiku, programmā ietvertas aptuvenas savstarpējās sakarības, kas balstās uz paraboliskās nokares līkni, kur pieņemts, ka vada piekāršanas augstumi atrodas vienā un tajā pašā līmenī. Pēc tam programma aprēķina kritiskos laidumus un, balstoties uz tiem, nosaka nepieciešamos režīmus vadu novērtēšanai. Tālāk seko pats vadu sistematiskais aprēķins, balstoties uz vada stāvokļa vienādojumu

vienpadsmit dažādiem aprēķina režīmiem (jāizvēlas vispiemērotākais, tātad visnelabvēlīgākais vada režīms). Kas attiecas uz balstu izvietojumu, tad šeit ir svarīgi ievērot visus šķērsojamus objektus un attiecīgi pārbaudīt pieļaujamos gabarītus līdz tiem (sk. 1.2. apakšnodaļas 1.2.1.7. punktu).

Abi režīmi darbojas kā ierobežojošie režīmi balstu izvietojumam uz profila (maksimālās nokares ierobežojums konkrētā laidumā). Minēto režīmu mehāniskie spriegumi vados atbilstoši izvēlētajam tipam atspoguļoti 4.4. un 4.5. attēlā. Rezultātā redzams, ka mehāniskais spriegums vadā režīmā ar vada sasilšanu līdz $+35^{\circ}\text{C}$ vadiem *Glasgow* un *Casablanca* (ACCC) un *Hawk 477* (ACCR) ir augstāks nekā tradicionālā tipa vadu – *AS-240/32* un *242-AL1/39-ST1A* (ACSR) – gadījumā. Līdzīga tendence novērojama režīmā ar vada sasilšanu līdz $+70^{\circ}\text{C}$, taču jau pie zemākām iegūtajām parametru vērtībām (sk. 4.5. att.).

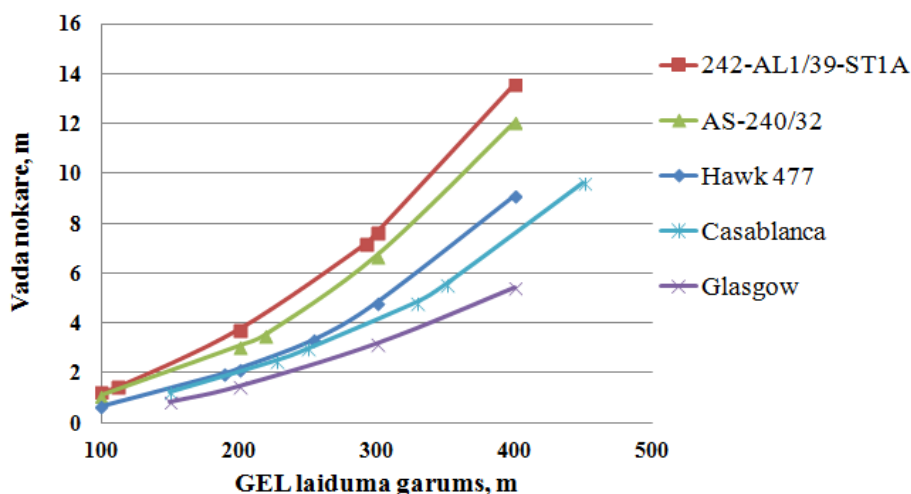


4.4. att. Mehāniskā sprieguma vadā un GEL laiduma garuma attiecība režīmā ar vada sasilšanu līdz $+35^{\circ}\text{C}$ dažādajiem vadu tiem līnijas LNr. 266 analīzei

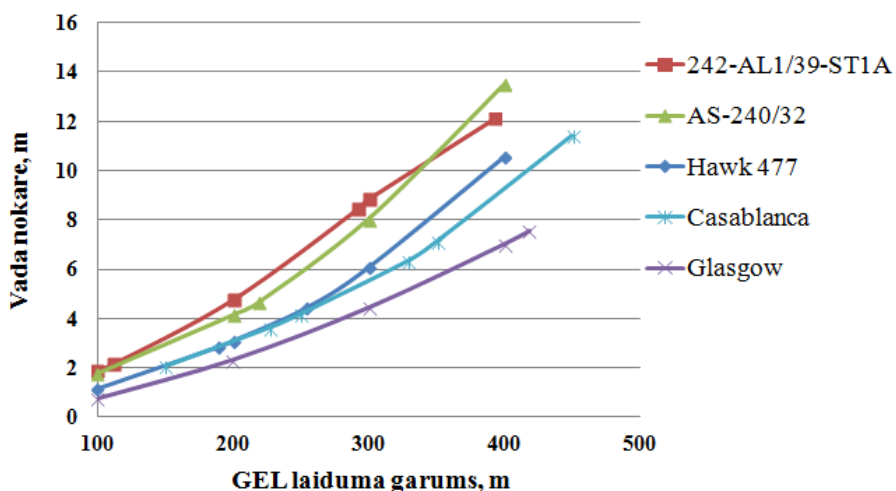


4.5. att. Mehāniskā sprieguma vadā un GEL laiduma garuma attiecība režīmā ar vada sasilšanu līdz $+70^{\circ}\text{C}$ dažādajiem vadu tiem līnijas LNr. 266 analīzei

Kā nākamo galveno balstu izvietojuma uz GEL trases profila mehānisko ierobežojumu var minēt vada nokari (sk. 4.6. un 4.7. att.). Izanalizējot iegūtās vada nokares vērtības, var secināt, ka abos grafikos lielākā nokare novērojama vadiem ar tradicionālā tipa serdeni – 242-AL1/39-ST1A un AS-240/32 (ACSR) salīdzinājumā ar HTLS tipa vadiem – *Glasgow* un *Casablanca* (ACCC) un *Hawk 477* (ACCR). Piemēram, ja aplūkojamās GEL laiduma garums ir 300 m un aprēķina nosacījumi atbilst režīmam ar vadu sasilšanu līdz +35°C, tad vada nokare ir 7,7 m, izmantojot 242-AL1/39-ST1A; 6,7 m – AS-240/32; 4,8 m – *Hawk 477*; 4,1 m – *Casablanca* un 3,2 m – *Glasgow*. Līdz ar to, balstoties uz iegūtajām vada nokares aprēķina vērtībām katram vadam, var secināt, ka lielākais gabarīts līdz zemei ir vadam *Glasgow* (ACCC), kam tātad dodama priekšroka, bet mazākais gabarīts līdz zemei, tātad nelabvēlīgākais variants, vērojams vadam 242-AL1/39-ST1A (ACSR).

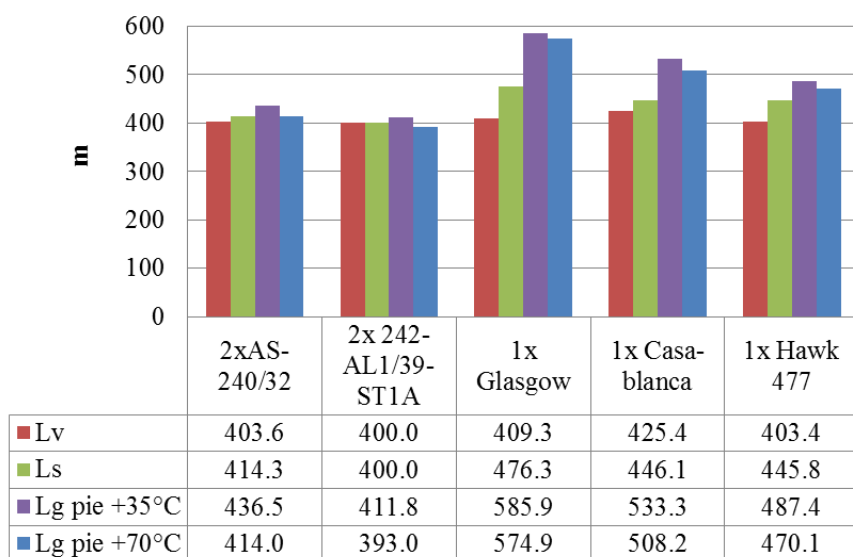


4.6. att. Vada nokares un GEL laiduma garuma attiecība režīmā ar vada sasilšanu līdz +35°C dažādajiem vadu tipiem līnijas LNr. 266 analīzei



4.7. att. Vada nokares un GEL laiduma garuma attiecība režīmā ar vada sasilšanu līdz +70°C dažādajiem vadu tipiem līnijas LNr.-266 analīzei

Aplūkojamā piemēra izmantojamo vadu pieļaujamie laidumi atspoguļoti 4.8. attēlā. Te redzams, ka vēja laidumi (L_v) ir noteicošie laidumi visiem aplūkojamajiem vadu tipiem kā galvenais nosacījums balstu izvietojumam GEL trasē (normatīvo gabarītu līdz zemei izpildes nepieciešamība). Piemēram, vadam *AS-240/32* L_v ir 403,6 m, kas ir sliktāks rādītājs, salīdzinot ar gabarīta laidumu (L_g), kas vienāds ar 436,5 m režīmā ar vadu sasilšanu līdz +35°C un 414,0 m režīmā ar vadu sasilšanu līdz +70°C, kā arī svara laidums (L_s), kas vienāds ar 414,3 m. Pārējiem vadiem novērojama līdzīga pieļaujamo GEL laidumu izvērtēšanas koncepcija un iegūto rezultātu tendence. Priekšroka dodama vadam *Casablanca*, jo te maksimāli pieļaujamais L_v ir 425,4 m, kas aptuveni par 25 m pārsniedz atbilstošo rādītāju vadam *242-AL1/39-ST1A* vai aptuveni par 22 m vadu *AS-240/32* un *Hawk 477* izmantošanas gadījumā, kā arī par 16 m vadam *Glasgow*, ja visi pārējie nosacījumi paliek nemainīgi.



4.8. att. Pieļaujamie vēja (L_v), svara (L_s) un gabarīta (L_g) laidumi abos režīmos dažādajiem vadu tipiem līnijas LNr. 266 analīzei

Kas attiecas uz GEL termisko ierobežojumu salīdzināšanas nolūkiem, lai nodrošinātu nepieciešamo GEL caurlaides spēju, katra vada tipa vadītspēja tika pieņemta atbilstoši to pieļaujamajai temperatūrai, tātad šajā gadījumā jānosaka katra aplūkojamā vada fāzes šķērsgriezums pēc pieļaujamās ilgstošās strāvas. Piemēram, zinot, ka pieļaujamā ilgstošā strāva vadam *AS-240/32* ir 605 A, taču pēc uzdotā nosacījuma līnijai jānodrošina 850 A strāva, tad šādu GEL caurlaides spēju nodrošina fāze, kas sadalīta divos vados *2xAS-240/32*, tā rezultātā *2xAS-240/32* nodrošinās 1210 A strāvu, kas ir lielāka par 850 A. Līdzīga aprēķina tendence ir novērojama pārējiem vadiem, ievērojot nosacījumu, ka HTLS tipa vadiem pieļaujamā temperatūra būs ievērojami lielāka to speciālās konstrukcijas dēļ, piemēram, viens

vads *1xCasablanca*, sasilstot līdz +120°C, var nodrošināt 922 A strāvu, kas apmierina nepieciešamo GEL aprēķina piemēra nosacījumu. Analizējot iegūtos rezultātus, var secināt, ka HTLS tipa vadiem – *Glasgow*, *Casablanca* un *Hawk 477* – ir lielāka pieļaujamā vada temperatūra nekā vadiem *AS-240/32* un *242-AL1/39-ST1A*, tātad, jo augstāka ir izvēlēta vada pieļaujamā temperatūra, jo lielāku strāvu iespējams pārvadīt pa konkrētu GEL, protams, nepasliktinot vada elektriskos parametrus (sk. 4.2. tabulu).

4.2. tabula

Dažādu vadu tipu termiskie parametri līnijai LNr. 266

Izmantojamie vadi									
<i>AS-240/32</i>		<i>242-AL1/ 39-ST1A</i>		<i>Glasgow</i>		<i>Casablanca</i>		<i>Hawk 477</i>	
Termiskie ierobežojumi									
Pieļaujamā vada temperatūra, °C									
70		80		120		120		210	
Pieļaujamā strāva, A									
2 vadi fāzē	1210	2 vadi fāzē	1260	1 vads fāzē	852	1 vads fāzē	922	1 vads fāzē	1293

4.2.1.3. Vadu ekonomiskā salīdzinājuma rezultāti

Šajā darbā ekonomiskais salīdzinājums balstās uz diviem pamatkritērijiem – starpbalstu (un enkurbalstu) skaitu un kopējo nepieciešamo materiālu un iekārtu apjomu.

Starpbalstu skaitu nosaka, izmantojot šādu izteiksmi [2]:

$$N = \frac{L}{L_{apr}}, \quad (4.1)$$

kur L – GEL trases garums, m; L_{apr} – aprēķina laidums, kas ir noteicošais balstu izvietojumam GEL trasē (vēja, svara vai gabarīta laidums), m.

Nosakot kopējos GEL kapitālieguldījumus dažādu vadu tipu izmantošanas gadījumā, šajā gadījumā netika ievērotas zemes nomas un transporta izmaksas pastāvīgi mainīgās cenas dēļ. Kas attiecas uz jaudas zudumiem, kas rodas ekspluatācijas laikā, tad to ietekme uz GEL projektēšanu detalizētāk apskatīta literatūrā [102]. Neskatoties uz to, ka šie parametri var daļēji ietekmēt GEL kopējos kapitālieguldījumus, šāda uzdevuma nostādne tiek pamatota ar vairākiem pamatiemesliem. Pirmkārt, pētījuma mērķis bija izvērtēt, kā starpbalstu skaita ietaupījums, kā arī kopējā nepieciešamā materiālu un iekārtu daudzuma ietaupījums, ieskaitot izvēlēta tipa vadus, ietekmē konkrētas GEL kopējos kapitālieguldījumus. Otrkārt,

iepriekšminēto parametru cenām ir mainīgs raksturs, kas atkarīgs galvenokārt no uzņēmumiem, kuri sniedz attiecīgo pakalpojumu, tāpēc izklāstītajam salīdzinošajam izvērtējumam ir aptuvens raksturs un šādu procesu iespējams aprakstīt divos galvenajos etapos. Pirmkārt, starpbalstu skaitu nosaka, izmantojot speciālu programmu *SAPR LEP*, kur balstu izvietojums uz profila atkarīgs no aplūkojamo vadu aprēķinātajiem pieļaujamiem gabarīta, vēja un svara laidumiem, kā arī visiem GEL šķērsotajiem objektiem un GEL trases reģiona topogrāfijas. Otrkārt, kad ir zināms aptuvens balstu skaits, iespējams noteikt GEL būvniecībai nepieciešamo kopējo materiālu un iekārtu daudzumu.

Aptuvens kopējo kapitālieguldījumu (C_{Σ}) aprēķins ietver piecus pamatkomponentus, un to nosaka pēc šādas formulas:

$$C_{\Sigma} = C_c + C_s + C_f + C_{str} + C_{\Sigma i}, \quad (4.2)$$

kur C_c – vada izmaksas, r.v.;

C_s – balsta izmaksas, r.v.;

C_f – balsta pamatu izmaksas, r.v.;

C_{str} – izolatoru virtenes komplekta izmaksas, r.v.;

$C_{\Sigma i}$ – kopējās montāžas izmaksas, r.v.

Katru formulas (4.2) komponentu nosaka pēc atbilstošām vienkāršotām izteiksmēm, kas detalizētāk sniegtas turpmāk.

➤ Vada izmaksas (C_c):

$$C_c = n_c \cdot 3N_{ph} \cdot L \cdot c_c, \quad (4.3)$$

kur n_c – ķēžu skaits GEL (vienķēdes ($n=1$), divķēžu ($n=2$) vai vairākķēžu);

N_{ph} – vadu skaits fāzē;

L – GEL trases garums, m;

c_c – vada cena par 1 m, r. v.

➤ Balsta izmaksas (C_s):

$$C_s = m_s \cdot N_s \cdot c_s, \quad (4.4)$$

kur m_s – metāla svars vienam konkrētam balstam, t;

N_s – balstu kopskaits, gab.;

c_s – balsta metāla cena par 1 t, r. v.

➤ Balsta pamatu izmaksas (C_f):

$$C_f = v_f \cdot N_s \cdot c_f, \quad (4.5)$$

kur v_f – dzelzsbetona pamatu tilpums vienam konkrētā balstam, m^3 ;

c_f – balsta dzelzsbetona pamatu cena 1 m^3 , r. v.

➤ Izolatoru virtenes komplekta izmaksas (C_{str}):

$$C_{str} = n_c \cdot n_{str} \cdot N_s \cdot c_{str}, \quad (4.6)$$

kur n_{str} – izolatoru virteņu komplektu skaits vienai GEL ķēdei, kas stiprināts pie konkrētā balsta tipa, gab.;

c_s – izolatoru virtenes komplekta cena par 1 gab., r. v.

➤ Kopējās montāžas izmaksas ($C_{\Sigma i}$):

$$C_{\Sigma i} = C_{ic} + C_{is} + C_{if} + C_{istr}, \quad (4.7)$$

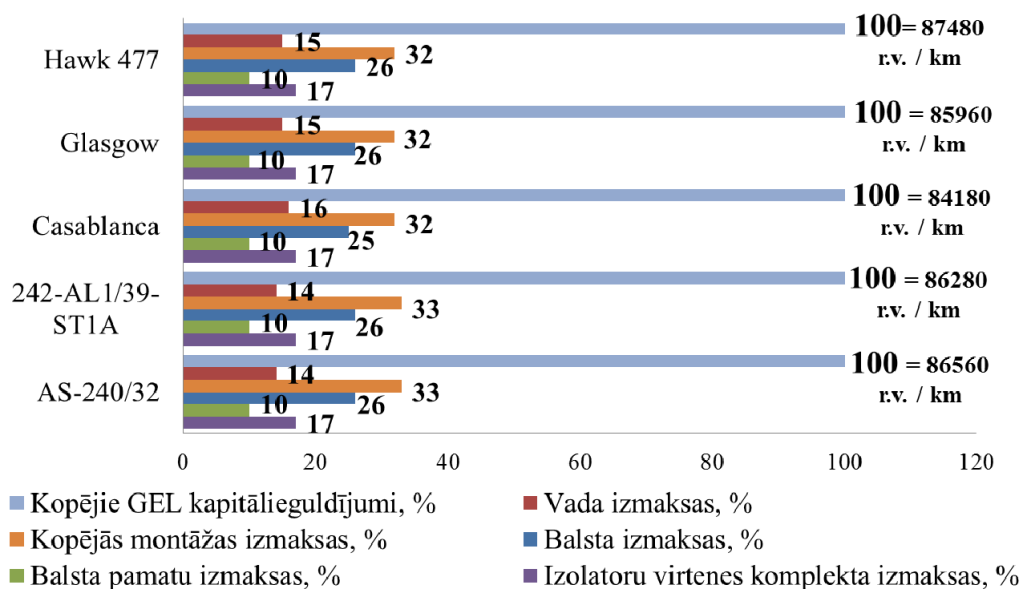
kur C_{ic} – vada montāžas izmaksas, r.v.;

C_{is} – balsta montāžas izmaksas, r.v.;

C_{if} – balsta pamatu uzstādīšanas izmaksas, r.v.;

C_{istr} – izolatoru virtenes komplekta montāžas izmaksas, r.v.

Iegūtie rezultāti par balstu kopskaitu rāda, ka, piekarot vadu *AS-240/32*, iegūto balstu skaits ir 125 gab., *242-AL1/39-ST1A* – 124 gab., *Glasgow* – 122 gab., *Casablanca* – 118 gab. un *Hawk 477* – 124 gab. Tad, zinot kopējo balstu skaitu, var noteikt kopējo nepieciešamo materiālu un iekārtu apjomu izvēlētajam GEL projektēšanas variantam (sk. 4.9. att.).



4.9. att. GEL LNr. 266 izbūves kapitālieguldījumi

Piemēram, lai izbūvētu 110 kV GEL LNr. 266, izmantojot *AS-240/32*, *242-AL1/39-ST1A* (ACSR) un *Hawk 477* (ACCR), izrādījās, ka nepieciešami augstāki GEL kapitālieguldījumi nekā, izmantojot HTLS tipa vadus – *Casablanca* un *Glasgow* (ACCC).

Atšķirība starp vadiem *AS-240/32* un *Glasgow* un *Casablanca* ir aptuveni 2,8%, savukārt vadiem *Hawk 477* šī atšķirība ir 3,9 %. Rezultātā kā optimālais GEL projektēšanas variants ar vismazākajiem kopējiem kapitālieguldījumiem – 84180 r.v./km – tika izvēlēta vadu *Casablanca* izmantošana, tad seko variants ar vadu *Glasgow* izmantošanu – 85960 r.v./km, pēc tam – vadi *242-AL1/39-ST1A* un *AS-240/32*, bet pēdējā vietā minams vads *Hawk 477*, kur GEL izbūves kapitālieguldījumi ir 87480 r.v./km.

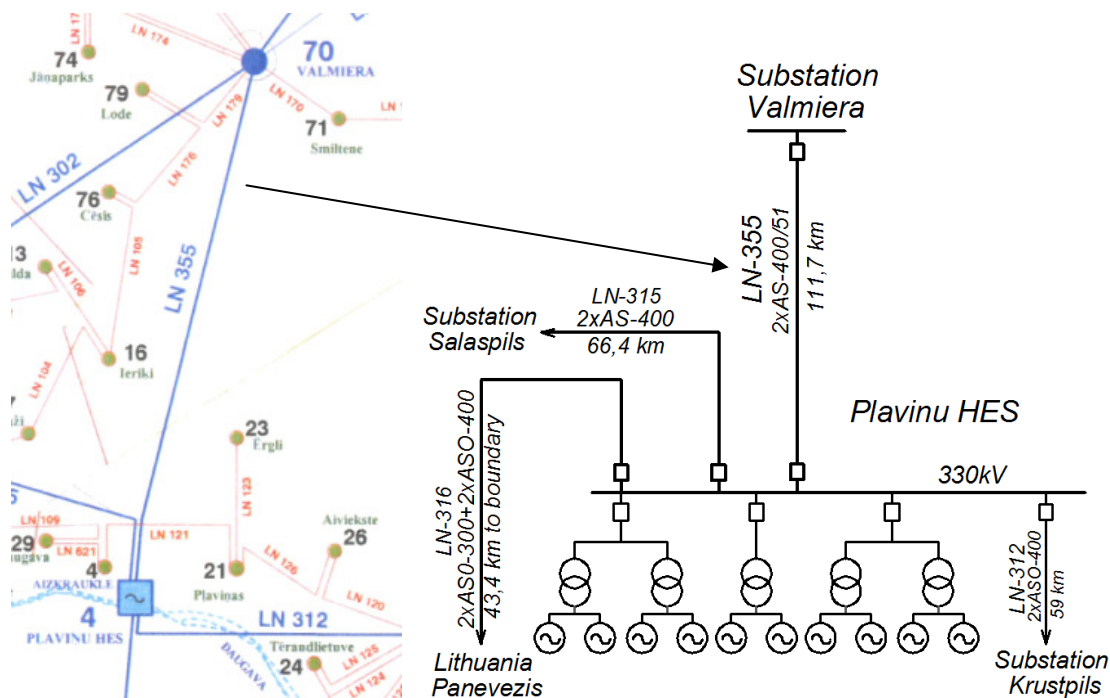
4.2.1.4. Secinājumi

1. Jāatzīmē, ka HTLS tipa vadiem piemīt lielāka mehāniskā izturība nekā ACSR tipa vadiem, galvenokārt tāpēc, ka HTLS tipa vadiem ir augsts elastības modulis un zems lineārās izplešanās koeficients, kas jūkami samazina vada nokari, tādējādi ļaujot palielināt GEL gabarīta laidumu – paplašina GEL mehāniskā ierobežojuma vērtības diapazonu.
2. Lielākais mehāniskais spriegums vadā, kas noved pie mazākās nokares un rezultātā labāka gabarīta līdz zemei, atspoguļots gadījumā, kad izmanto ACCC – *Glasgow* un *Casablanca* – un ACCR – *Hawk 477* tipa vadus; pretēja sakarība vērojama ACSR tipa vadiem – *242-AL1/39-ST1A* un *AS-240/32*.
3. Ja izejas dati paliek nemainīgi, izņemot konkrēta tipa vada pieļaujamo temperatūru, priekšroka dodama ACCC tipa vadam – *Casablanca* – salīdzinājumā ar tradicionālā tipa vadu ACSR – *242AL1/39-ST1A*, jo L_v palielinās par aptuveni 25 m jeb aptuveni par 6%, bet balstu skaits attiecīgi samazinās par 6 gab. un izolatoru virteņu komplektu skaits – aptuveni par 18 gab.;
4. Attiecībā uz ekonomiskā salīdzinājuma rezultātiem var secināt, ka, izmantojot vadu *Casablanca*, GEL izbūves kapitālieguldījumi ir viszemākie – 84180 r.v./km, turpretī vadam *Hawk 477* (neskatoties uz to, ka tas ir HTLS tipa vads) šīs izmaksas ir visaugstākās – 87480 r.v./km.
5. Pastāvot masveida pieprasījumam, cenas HTLS tipa vadiem var būtiski samazināties, un tad vadu ar kompozītmateriāla serdeni izmantošana kļūs ekonomiski pamatota.
6. Rezultātā HTLS vadu izmantošana var kalpot par vienu no pamatoti iespējamām augstsprieguma elektrolīniju optimizācijas paņēmieniem esošo GEL ierobežotās caurlaides spējas paaugstināšanai sakarā ar pastāvīgo elektroenerģijas pieprasījuma palielināšanos mūsdienās.

4.2.2. GEL aprēķina piemērs, kas balstās uz esošo 330 kV GEL LNr. 355

4.2.2.1. Izejas dati un aprēķina nosacījumi

GEL *Valmiera – Pļaviņu HES* (LNr. 355) piemērs izvēlēts sakarā ar pamatmērķi – palielināt esošās GEL caurlaides spēju un paaugstināt energosistēmas drošumu valstī. GEL garums ir 111,7 km (sk. 4.10. att., kā arī 4. pielikumu).



4.10. att. Esošās GEL LNr. 355 elektriskā shēma

Izvirzītā uzdevuma mērķiem GEL trases reģionā pieņem sekojošus klimatiskos apstākļus:

- ✓ vēja spiediens: 400 N/m^2
- ✓ apledošanas sieniņas biezums: 10 mm;
- ✓ minimālā gaisa temperatūra: -40°C ;
- ✓ maksimālā gaisa temperatūra: $+35^\circ\text{C}$;
- ✓ gada vidējā ekspluatācijas gaisa temperatūra: $+5^\circ\text{C}$.

330 kV GEL tika izvēlēti PVS-330A tipa betona starpbalsti (sk. 12. pielikumu).

Pētījuma uzdevumam pieņem šādus vadus: esošais *AS-400/51*, *Brussels* (ACCC), *Wabash* (ACCR), *Redwing* (GTACSR), kuru tehniskie dati atspoguļoti 4.3. tabulā. HTLS tipa vadu raksturojums un apskats sniegts 1.3. apakšnodaļas 1.3.2. punktā.

GEL LNr. 355 apskatīto vadu tehniskie dati

Vadu fizikālās īpašības	Apzīmējums	Mērvienība	<i>AS-400/51</i>	<i>Brussels</i>	<i>Wabash</i>	<i>Redwing</i>
Vada diametrs	d	mm	27,5	25,1	25,2	27,3
Vada šķērsriezums	s	mm ²	445,1	469,72	449	447,6
Vada elastības modulis	E	GPa	77	73,6	73,5	87,4
Lineārās izplešanās koeficients	α	1 / °C	19.8/ 10 ⁶	19.2/ 10 ⁶	16.4/ 10 ⁶	18.2/ 10 ⁶
Vada lineārā slodze	P1	kg/m	1,49	1,25	1,26	1,67
Vada reducētā īpatnējā slodze	Y1	kg/m·mm ²	3,35/ 10 ³	2,67/ 10 ³	2,79/ 10 ³	3,72/ 10 ³
Graujošais mehāniskais spriegums vadā	σ_d	N	112,8	105,9	111,8	111,8
Vadu skaits fāzē	N	gab.	2	1	1	1

4.2.2.2. Vadu tehniskā salīdzinājuma rezultāti

Iegūtie LNr.-355 mehānisko un termisko ierobežojumu aprēķinu rezultāti atspoguļoti 4.4. tabulā.

Vispirms aplūkosim mehāniskos ierobežojumus. Šeit redzams, ka vadiem *AS-400/51*, *Brussels*, *Wabash* un *Redwing* L_g ir noteicošais laidums. Piemēram, L_g vadam *AS-400/51* ir 338,2 m, kas ir vissliktākais rādītājs, ja salīdzina ar L_v , kas vienāds ar 417,7 m, un L_s , kas vienāds ar 415,2 m. Pārējo vadu rezultāti rāda līdzīgu likumsakarību. Priekšroka dodama vadam *Wabash*, jo šeit maksimālais pieļaujamais L_g ir 362,5 m, kas ir aptuveni par 24,3 m lielāks nekā, izmantojot vadu *AS-400/51*, vai aptuveni par 36,6 m lielāks nekā, izmantojot vadu *Redwing*, ja visi pārējie nosacījumi paliek nemainīgi. Lielākā nokare vērojama gadījumā ar ACCC tipa vadu – *Brussels*, kas vienāda ar 9,8 m, kas ir par 1,5 m vairāk nekā, izmantojot vadu *Redwing* – 8,3 m, jo vadam *Redwing* L_g ir vismazākais – tikai 325,9 m.

Tālāk apskatīsim termiskos ierobežojumus. Šajā gadījumā nepieciešams noteikt katras fāzes vada šķērsriezumu atbilstoši pieļaujamajai strāvai. Izvirzītā uzdevuma mērķiem aplūkojamajai LNr. 355 pieņemam strāvu 1200 A. Piemēram, vadam *AS-400/51* pieļaujamā strāva ir 825 A; lai nodrošinātu 1200 A, nepieciešams fāzi sašķelt divos vados – $2 \times AS-400/51$, un rezultātā šis vads nodrošinās strāvu 1650 A. Taču, tā kā tas ir tēraudalumīnija vads, tad maksimāli pieļaujamā vada temperatūra ir tikai 70°C [146]. Savukārt vadam *Brussels* maksimāli pieļaujamā strāva ir 1220 A pie vada pieļaujamās darba temperatūras 120°C, vadam *Wabash* – 1681 A (pie temperatūras 240°C), vadam *Redwing* – 1414 A (pie vada temperatūras 210°C). Rezultātā var secināt, ka vadi *Brussels*, *Wabash* un *Redwing*

pilnībā atbilst izvirzītā uzdevuma nostādnes nosacījumiem bez fāzes papildu sašķelšanas nepieciešamības.

4.4. tabula

Dažādo GEL LNr. 355 izmantojamo vadu tipu salīdzinājums

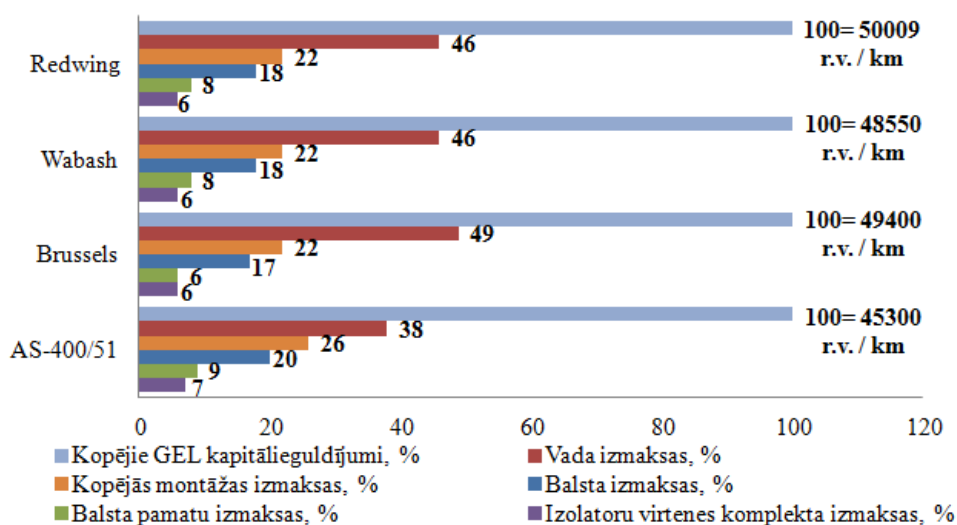
Vada <i>AS-400/51</i> montāža		Vada <i>Brussels</i> montāža		Vada <i>Wabash</i> montāža		Vada <i>Redwing</i> montāža	
<i>Mehāniskie ierobežojumi</i>							
Pieļaujamais mehāniskais spriegums vadā, N							
$\sigma_{\max}$	112.8	$\sigma_{\max}$	105.9	$\sigma_{\max}$	111.8	$\sigma_{\max}$	111.8
$\sigma_{\min}$	112.8	$\sigma_{\min}$	105.9	$\sigma_{\min}$	111.8	$\sigma_{\min}$	111.8
σ_{eks}	79.5	σ_{eks}	84.4	σ_{eks}	87.3	σ_{eks}	109.8
<i>Laidumi, nokares un gabarīti līdz zemei, m</i>							
L_v	417,7	L_v	456,8	L_v	455,8	L_v	420,5
L_s	415,2	L_s	468,1	L_s	467,2	L_s	392,1
L_g	338,2	L_g	359,5	L_g	362,5	L_g	325,9
F_g	8,3	F_g	9,8	F_g	9,5	F_g	8,3
$C_{g \text{ norm}}$	7,5	$C_{g \text{ norm}}$	7,5	$C_{g \text{ norm}}$	7,5	$C_{g \text{ norm}}$	7,5
<i>Termiskie ierobežojumi</i>							
Pieļaujamā vada temperatūra, °C							
70		120		240		210	
<i>Pieļaujamā strāva, A</i>							
2 vadi fāzē	1650	1 vads fāzē	1220	1 vads fāzē	1681	1 vads fāzē	1414

4.2.2.3. Vadu ekonomiskā salīdzinājuma rezultāti

Iegūtie rezultāti par balstu kopskaitu rāda, ka, piekarot vadu *AS-400/51*, iegūto starpbalstu skaits ir 330 gab., *Brussels* – 310 gab., *Wabash* – 308 gab. un *Redwing* – 343 gab. Piemēram, izmantojot vadu *Wabash* aplūkojamajai GEL trasei, ietaupās 22 starpbalsti, salīdzinot ar gadījumu, kad izmanto vadu *AS-400/51*, vai 35 starpbalsti salīdzinājumā ar gadījumu, kad izmanto vadu *Redwing*. Tādējādi, ja ir zināms starpbalstu skaits, tad, balstoties uz aplūkojamās GEL izejas datiem un aprēķina nosacījumiem, var noteikt kopējos GEL izbūves kapitālieguldījumus (pieņemto aptuveno GEL kopējo kapitālieguldījumu aprēķinu sk. 4.2. apakšnodaļas 4.2.1.3. punktā).

330 kV GEL LNr. 355 kopējie izbūves kapitālieguldījumi atspoguļoti 4.11. att., kur redzams, ka izmantojot vadus *Brussels*, *Wabash* un *Redwing*, GEL kopējie kapitālieguldījumi izrādās augstāki par 330 kV GEL kapitālieguldījumiem, ja izmanto tradicionālā tipa vadu *AS-400/51*, un starpība ir no 6,6% starp vadiem *AS-400/51* un *Wabash* līdz 9,5% starp vadiem *AS-400/51* un *Brussels*. Piemēram, lai izbūvētu 330 kV GEL, izmantojot vadu *AS-400/51*, nepieciešamie kapitālieguldījumi ir 45300 r.v./km, kas ir vismazākais rādītājs salīdzinājumā

ar pārējiem vadiem, piemēram, vadu *Wabash* – 48550 r.v./km, rezultātā var secināt, ka šajā gadījumā vada *AS-400/51* izmantošana ir optimālais GEL projektēšanas variants.



4.11. att. GEL LNr. 355 izbūves kapitālieguldījumi

4.2.2.4. Secinājumi

1. GEL LNr. 355 piemēra tehniskā aspekta aprēķina rezultāti rāda, ka, ja izejas dati un aprēķina nosacījumi, izņemot atbilstošā vada pieļaujamo temperatūru, paliek nemainīgi, būvējot 111,7 km garu 330 kV GEL ar jauno konstrukciju vadiem HTLS, piemēram, *Brussels* (ACCC), salīdzinājumā ar tradicionālā tipa vada izmantošanu – *AS-400/51*, L_g palielinās par 21,3 m vai aptuveni par 5,9%; attiecīgi balstu skaits samazinās par 20, bet izolatoru virteņu komplektu skaits – aptuveni par 60 (3%).
2. Vadam *Wabash* (ACCR) dodama priekšroka, jo maksimālais pieļaujamais gabarīta laidums ir 362,5 m, kas ir aptuveni par 24,3 m vairāk nekā, izmantojot vadu *AS-400/51*, tādējādi starpbalstu skaits samazinās par 22 gab.
3. Savukārt, skatoties no ekonomiskā aspekta rezultātiem, var secināt, ka, kaut gan HTLS tipa vada ekonomiskais izdevīgums šajā uzdevumā netika pierādīts šādu jaunās konstrukcijas vadu augsto cenu dēļ, tomēr būtiski piezīmēt, ka GEL kopējos izbūves kapitālieguldījumus iespējams samazināt, ja, nosakot GEL kopējos kapitālieguldījumus, galveno akcentu liktu uz HTLS vada tipa garuma samazinājumu, piemēram, piekarot vienu HTLS tipa vadu parasto $2 \times AS-400/51$ vadu vietā (tas atkarīgs no GEL uzstādītās pārvadāmās jaudas un izvēlēta vada šķērsgriezuma), pretēja gadījumā 330 kV GEL kapitālieguldījumi, izmantojot HTLS tipa vadus, tikai pieaugs.

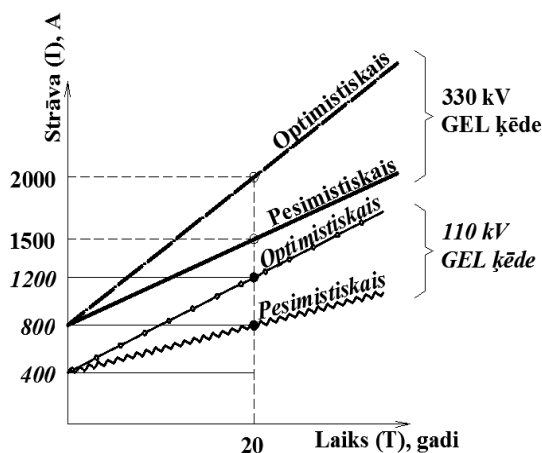
4.3. Projekta „Kurzemes loks” (1. posms), kas ietver 330/110 kV GEL būvi, optimizācijas rezultāti

4.3.1. GEL optimizācijas piemērs, daļēji balstoties uz stohastiskās pieejas un spēļu teorijas kritērijiem ar Pareto un scenāriju pieejas izmantošanu

GEL piemērs, kurā izmantota iepriekš aprakstītā GEL projektēšanas optimizācijas pieeja (sk. 2. nodaļu), balstās uz reālu projektu „Kurzemes loks” (1. posms), kas ietver 330/110 kV GEL būvi (sk. 4.1. apakšnodaļu).

Baltijas reģionā (Latvijā, Lietuvā, Igaunijā, Krievijas rietumu piekrastē un Baltkrievijā) tiek veikta vairāku lielu enerģētikas objektu, to vidū arī AES, projektēšana un būve. Jau pašlaik īstenoti vai arī drīzumā tiks īstenoti vairāki projekti, tostarp zemūdens kabeļi un GEL, lai izveidotu elektriskos savienojumus ar Skandināvijas un Polijas energosistēmām. Iepriekš izanalizējot Latvijas energosistēmu režīmus, atklājas nepieciešamība būvēt jaunas GEL. Energosistēmas shēmas fragments, kas ietver šīs līnijas, sniegts 4.3. attēlā, kur redzama tikai neliela daļa no visas apvienotās energosistēmas. Elektrodinamiskais modelis, kas tika izmantots, lai aprēķinātu Latvijas energosistēmas statisko un dinamisko režīmu, aptver visu Baltijas valstu reģionu un ietver vienu no galvenajiem mērķiem aplūkojamās GEL maksimāli pieļaujamās strāvas izvēlei. Rezultātā energosistēmu analīze pēc reģiona attīstības scenārijiem ļāva izdalīt šādas alternatīvas jaunajai GEL (sk. 4.12. att.):

- 110 kV GEL ar maksimālo strāvu 1200 A (optimistiskais scenārijs) vai 800 A (pesimistiskais scenārijs).
- 330 kV GEL ar maksimālo strāvu 2000 A (optimistiskais scenārijs) vai 1500 A (pesimistiskais scenārijs).



4.12. att. GEL maksimālās strāvas optimistiskie un pesimistiskie scenāriji 330 kV un 110 kV GEL ķēdēm

Pieņemtie Baltijas jūras piekrastes reģionā izvietotās GEL trases klimatiskie apstākļi atbilst KL projektēšanas uzdevuma izejas datiem (sk. 4.1. apakšnodaļas 4.1.3.punktu).

Rezultātā formulējam jaunās GEL konstrukciju un parametru optimizācijas uzdevumu. Pārskatot GEL optimālos risinājumus, izmantojot specializēto GEL projektēšanas programmatūru *PLS-CADD* [104], tika atlasītas divdesmit alternatīvas, kas veidojas no dažādām balstu un vadu (HTLS un ACSR tipa vadi) kombinācijām (sk. 4.5. tabulu). Lai vienkāršotu izvirzītā uzdevuma nostādni, pirmajā etapā minimizējam kapitālieguldījumus NPV maksimizēšanas vietā, savukārt noslēdzošajā etapā iespējamo alternatīvu salīdzinājumam jau izmantojam laikietilpīgo uzdevumu ar NPV kritērijiem.

Izvirzītā uzdevuma atrisināšanai pieņemam trīs vadu pamattipus:

- 1) tradicionālā tipa vads – ACSR [46];
- 2) HTLS tipa vads ar alumīnija dzīslām un kompozīta serdeni – ACCC [53];
- 3) HTLS tipa pastiprinātais vads ar alumīnija dzīslām un kompozītmateriāla serdeni – ACCR [150].

Tad, izvēloties vadu un balstu tipus, atlasījām šādas alternatīvas (sk. 4.18. att.):

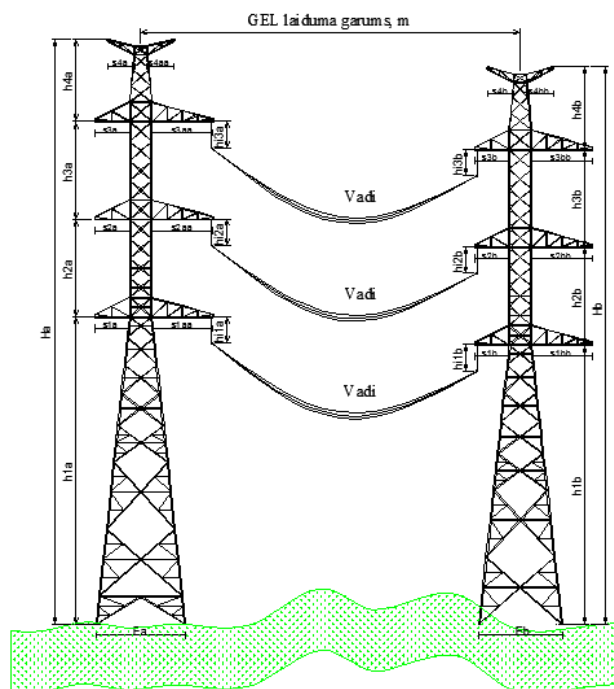
- a) A1 un A10; A11 un A20 nozīmē, ka tiek izmantoti tradicionālā tipa vadi kā 110 kV, tā 330 kV GEL ķēdēm;
- b) A6...A9; A16...A19 – tiek izmantoti HTLS tipa vadi kā 110 kV, tā 330 kV GEL ķēdēm;
- c) A2...A5; A12...A15 – tiek izmantoti tradicionālā tipa vadi, kas kombinēti ar HTLS tipa vadiem 110 kV un 330 kV GEL ķēdēm.

4.5. tabula

Aplūkotās GEL projektēšanas alternatīvas

Alternatīvas nosaukums	Kapitālieguldījumi (I _C), r.v.	Alternatīvas nosaukums	Kapitālieguldījumi (I _C), r.v.
	<i>Optimistiskais scenārijs Nr. 1</i>		<i>Pesimistiskais scenārijs (Nr. 2)</i>
A1	5,22	A11	4,85
A2	5,23	A12	4,86
A3	5,23	A13	4,86
A4	4,70	A14	4,37
A5	4,69	A15	4,36
A6	4,95	A16	4,60
A7	4,53	A17	4,21
A8	4,95	A18	4,60
A9	4,41	A19	4,10
A10	4,30	A20	3,93

Balstoties uz agrāko pieredzi, būvējot aplūkojamā sprieguma GEL, un pārrunām ar balstu izgatavotājiem, tika izvēlēti divu veidu balsti, kas redzami 4.13. attēlā. Šajā gadījumā pastāv divi tehniskie pamatrisinājumi GEL projektēšanā. Pirmkārt, standarttipa balstu izmantošana (augstums līdz zemākajam vada piekāršanas punktam ir 20 m), kombinējot tos ar dažādiem vadu tiem. Otrkārt, tāds pats risinājums kā iepriekšējā gadījumā, bet ar tādu atšķirību, ka šeit izmanto augstākus balstus (augstums līdz zemākajam vada piekāršanas punktam jau ir 22 m).



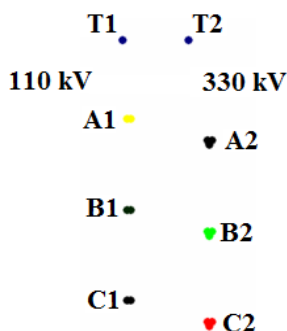
4.13. att. Izvēlēto balstu konstruktīvā skice GEL analīzei

Balstu augstumi, GEL laidumu garumi, gabarīti līdz zemei vai šķērsojamajiem objektiem nosaka EL un ML parametrus, kuru vērtības regulē ar nolūku samazināt ietekmi uz vidi. Lai vienkāršotu šīs ietekmes noteikšanu, tika veikti EL un ML aprēķini, izmantojot specializētu datorprogrammu [139]. Rezultātā EL tika definēts kā galvenais GEL projekta realizāciju ietekmējošais ierobežojums šajā pētījumā. EL pārbaude bija vienkāršota, jo šeit izmantoja ar pieejamo datorprogrammu iegūtus rezultātus, kas sniegti grafiskā un tabulas veidā, lai izvērtētu aplūkojamās alternatīvas un pieņemtu galīgo lēmumu par GEL būvi.

330/110 kV GEL starpbalstu izvēlējās kā galveno balstu, lai aprēķinātu EL un ML parametrus (sk. 3. pielikumu). Fāžu izvietojums uz balsta aplūkojamajai GEL parādīts 4.14. att., kur A1, B1, C1 – fāzes vadu piekāršanas punkti 110 kV GEL ķēdei; A2, B2, C2 –

fāzes vadu piekāršanas punkti 330 kV GEL ķēdei; T1 un T2 – zibensaizsardzības troses un OPGW piekāršanas punkti.

Atbilstoši KL GEL projektēšanas nosacījumiem pieņemts, ka gabarīts līdz zemei 110 kV GEL ķēdei ir 10 m, bet 330 kV – 8 m. 330/110 kV GEL normatīvo gabarītu nodrošināšanai fāžu un zibensaizsardzības troses (un OPGW) centru izvietojuma koordinātas ($X + jY$) un fāžu spriegumi $\dot{U}_{fi}$ ir doti 4.6. tabulā.



4.14. att. 330/110 kV GEL shēma ar abu ķēžu fāžu izvietojumu

4.6. tabula

Fāžu un zibensaizsardzības troses (un OPGW) centru izvietojuma koordinātas un fāžu spriegumi (potenciāli), kas nepieciešami, lai nodrošinātu minimālos GEL gabarītus līdz zemei

GEL fāze, zibens- aizsardzības trose un OPGW	$X + jY$, m	$\dot{U}_{fi}$, kV	GEL fāze, zibens- aizsardzības trose un OPGW	$X + jY$, m	$\dot{U}_{fi}$, kV
A1	$-2,2 + j24$	63,51	A2	$4,4 + j22,23$	190,53
B1	$-2,2 + j17$	$63,51e^{-j120^\circ}$	B2	$4,4 + j15,23$	$190,53e^{-j120^\circ}$
C1	$-2,2 + j10$	$63,51e^{j120^\circ}$	C2	$4,4 + j8,23$	$190,53e^{j120^\circ}$
T1	$-2,7 + j30,13$	0	T2	$2,7 + j30,13$	0

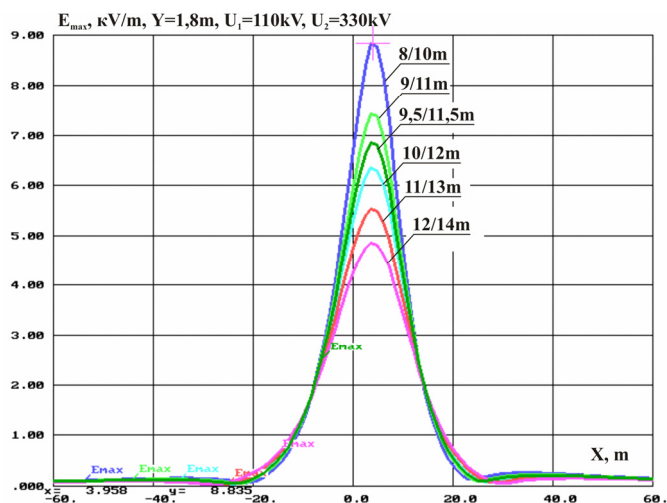
Izmantojot EL un ML intensitātes aprēķina rezultātus, kas iegūti ar speciālas programmatūras palīdzību [139], var secināt, ka 110 kV GEL ķēdes fāzes vadam EL intensitātes efektīvā vērtība, sākot ar koronas izlādi uz vada virsmas (E_0) [119], ir vienāda ar 22,30 kV/cm, savukārt 330 kV GEL ķēdes fāzes vadam – 21,58 kV/cm.

Tā kā EL intensitāti uz vada virsmas (E_C) ierobežo tāds nosacījums kā $E_C \leq 0,9 E_0$, tad E_C vērtībai nebūtu jāpārsniedz šādas robežvērtības:

- ✓ 110 kV GEL ķēdes fāzes vadam – $E_C \leq 20,1$ kV/cm;
- ✓ 330 kV GEL ķēdes fāzes vadam – $E_C \leq 19,4$ kV/cm.

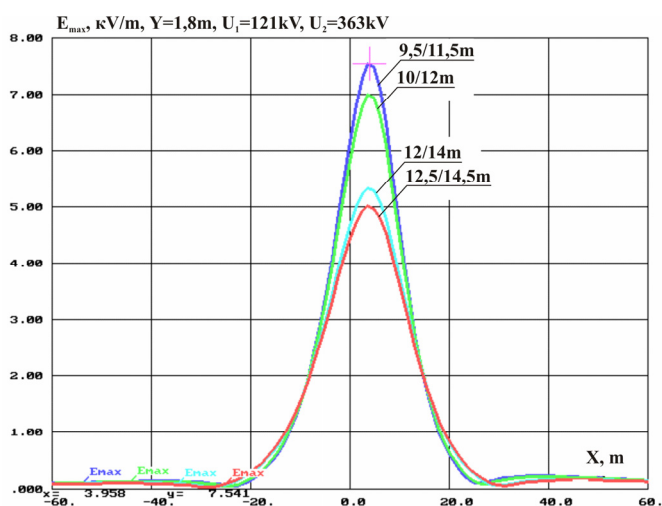
EL intensitātes (E_{max}) sadalījuma līknes $Y=1,8$ m augstumā virs zemes 330/110 kV GEL šķērsgrīzumā minimālajiem 330/110 kV fāžu vadu gabarītiem līdz zemei: 8/10 m, 9/11 m,

9,5/11,5 m, 10/12 m, 11/13 m, 12/14 m un ķēžu līnijas sprieguma vērtībām $U_1 = 110$ kV un $U_2 = 330$ kV parādītas 4.15. attēlā.



4.15. att. EL intensitātes ($E_{\max}$) sadalījums augstumā $Y = 1,8$ m virs zemes 330/110 kV GEL šķērsgrīzumā minimālajiem 330/110 kV fāžu vadu gabarītiem līdz zemei: 8/10 m, 9/11 m, 9,5/11,5 m, 10/12 m, 11/13 m un 12/14 m

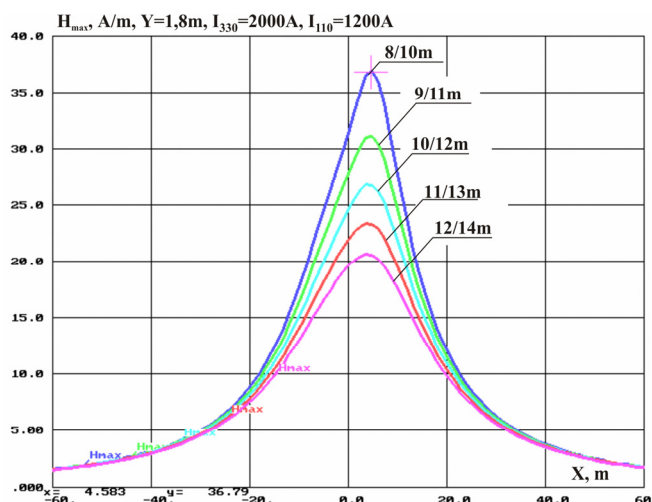
Pie ķēžu minimālajiem 330/110 kV vadu gabarītiem līdz zemei, kas vienādi ar 8/10 m, EL intensitātes vērtība ($E_{\max}$) sasniedz 8,8 kV/m. Šajā gadījumā $E_{\max}$ vērtība ir mazāka par 7 kV/m pie ķēžu minimālajiem 330/110 kV fāžu vadu gabarītiem līdz zemei, kas vienādi ar 9,5/11,5 m (sk. 4.15. att.). Tomēr ar pieņemamās robežās esošu līnijas sprieguma pieaugumu par 10%, kad spriegums ķēdē būs 363/121 kV, $E_{\max}$ minimālajiem 330/110 kV vadu gabarītiem līdz zemei 9,5/11,5 m pieaugs līdz 7,5 kV/m, bet pie gabarītiem 10/12 m $E_{\max}$ kļūst vienāda ar 7,0 kV/m (sk. 4.16. att.).



4.16. att. EL intensitātes ($E_{\max}$) sadalījums augstumā $Y = 1,8$ m virs zemes 330/110 kV GEL šķērsgrīzumā ar līnijas spriegumiem 363/121 kV minimālajiem 330/110 kV vadu gabarītiem līdz zemei 9,5/11,5 m, 10/12 m, 12/14 m un 12,5/14,5 m

Tādējādi, kad pastāv līnijas sprieguma pieaugums par 10 %, nosacījums $E_{\max} \leq 7 \text{ kV/m}$ (CENELEC) [146] tiek sasniegts ar minimālajiem 330/110 kV vadu gabarītiem līdz zemei 10/12 m, bet nosacījums $E_{\max} \leq 5 \text{ kV/m}$ (ICNIRP) [76] – ar minimālajiem gabarītiem 12,5/14,5 m (sk. 4.16. att.).

ML intensitātes ($H_{\max}$) sadalījums augstumā $Y=1,8 \text{ m}$ virs zemes pie fāžu strāvu moduļu vērtībām 2000 A 330 kV GEL ķēdei un 1200 A 110 kV GEL ķēdei normatīvajiem minimālajiem 330/110 kV fāžu vadu gabarītiem līdz zemei 8/10 m, 9/11 m, 10/12 m, 11/13 m un 12/14 m atspoguļots 4.17. attēlā. Lielākā ML intensitātes vērtība ($H_{\max}$) pat pie minimālajiem 330/110 kV vadu gabarītiem līdz zemei 8/10 m ir 36,8 A/m ($46 \mu\text{T}$), kas ir mazāk nekā 320 A/m (CENELEC) un 80 A/m (ICNIRP) (sk. 3. pielikumu).



4.17. att. ML intensitātes ($H_{\max}$) sadalījums augstumā $Y = 1,8 \text{ m}$ virs zemes 330/110 kV GEL šķērsgrīzumā pie fāžu strāvu moduļu vērtībām 2000 A 330 kV ķēdei un 1200 A 110 kV ķēdei šādiem minimālajiem 330/110 kV vadu gabarītiem līdz zemei: 8/10 m, 9/11 m, 10/12 m, 11/13 m un 12/14 m

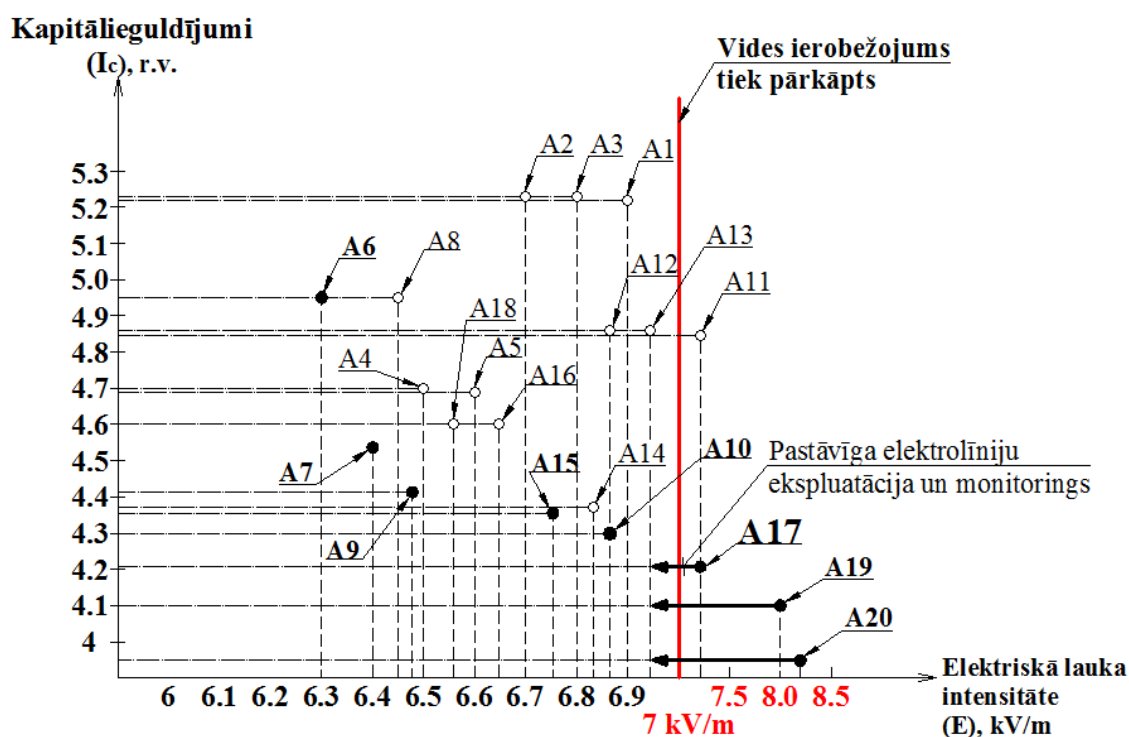
Apkopojot ML un EL intensitātes sadalījuma aprēķinu rezultātus, var secināt, ka ML intensitāte pilnībā atbilst pastāvošajām normām, savukārt EL intensitāte var neatbilst izvirzītajām prasībām elektropārvades tīkla „šaurajās vietās”. Lai atrisinātu pastāvošo problēmu, tika piedāvāts zemāk aplūkotais GEL projekta realizācijas optimālais risinājums.

GEL divkritēriālās optimizācijas optimālo risinājumu iegūtie rezultāti (konstruēta divdimensiju plakne pēc divdesmit alternatīvām), izmantojot Pareto pieeju [101], kur I_C (r.v.) ir kapitālieguldījumi un E (kV/m) ir EL intensitāte, kas šajā pētījumā definēta kā visvairāk ietekmējošais ierobežojums GEL projekta realizācijā, atainoti 4.18. attēlā. Tad, izvērtējot iepriekš atlasītās divdesmit alternatīvas ar Pareto pieejas palīdzību, iegūstam, ka konkurētspējīgās alternatīvas ir A6, A7, A9, A10, A15, A17, A19 un A20. Tālāk seko tikai

konkurētspējīgo alternatīvu izskatīšana, izmantojot šeit jau laukietilpīgāko un precīzāko NPV metodi vienkāršotās kapitālieguldījumu analīzes vietā (sk. 4.7. tabulu).

Rezultātā analīze rāda, ka:

- ja pastāv „klasiskais” problēmas formulējums, proti, NPV maksimizēšana, ievērojot visus GEL projekta realizāciju ietekmējošos ierobežojumus, tad jāizvēlas alternatīva A10. Galīgais lēmums jāpieņem, izmantojot un analizējot mehānisko, termisko un vides ierobežojumu kritēriju;
- ja kādu definēto ierobežojumu neievērošana ir pieļaujama, tad būtu jāizvēlas viena no alternatīvām A17 vai A19, ievērojot izvēlētajās alternatīvas rašanās iespējas varbūtību.



4.18. att. Pareto kopas diagramma, kas konstruēta pēc atlasītajām alternatīvām GEL projekta realizācijai

4.7. tabula

NPV un ierobežojumu rādītāju Pr_i sagaidāmās vērtības

Alternatīvas	Optimistiskais scenārijs Nr. 1	Pesimistiskais scenārijs Nr. 2
	$NPV_{II} R_{II}$	$NPV_{II} R_{II}$
A10	4,7 // 6,9	5,4 / 5,0
A17	6,2 // 7,1	5,33 / 5,6
A19	6,7 // 8,0	5,7 / 7,3

Lai pieņemtu galīgo lēmumu par GEL projektēšanu un celtniecību, jāizvērtē riski, kas var rasties un radīt izmaiņas augstsprieguma elektrolīnu ekspluatācijas laikā, kas savukārt novestu pie papildu ekonomiskiem zaudējumiem. EL intensitātes robežvērtību (7 kV/m) pārkāpšana aplūkotajam piemēram Latvijas klimatiskajos apstākļos var notikt pie maksimālās gaisa temperatūras +35°C un maksimālās uzstādītās slodzes strāvas. Šo abu nosacījumu kombinēšanās varbūtība ir ļoti neliela. Piemēram, alternatīvai A10 varbūtības vērtība ir 0,01, savukārt alternatīvai A17 – 0,000001 (abas varbūtības vērtības noteiktas pēc optimistiskā scenārija, tātad visnelabvēlīgākajam gadījumam, kad pastāv maksimālā GEL noslodze). Pēc iepriekšminēto varbūtību apsvēršanas alternatīva A17 būtu jāizvēlas kā galīgais lēmums GEL projekta īstenošanai, bet ar obligātu papildu nosacījumu – nepieciešama pastāvīga GEL ekspluatācija un monitorings, lai tiktu izpildīti pastāvošie likumdošanas noteikumi attiecībā uz pieļaujamo EL intensitātes vērtību.

4.3.2. GEL optimizācijas piemērs ar koalīcijas dibināšanas iespēju

Veiktais pētījums veltīts otram speciālgadījumam (sk. 2.6. apakšnodaļu), papildus pieņemot, ka ir iespējams izveidot koalīciju ar citu uzņēmumu. Vairumā gadījumu ir paredzams abpusējs izdevīgums. Piedāvātā stratēģija balstās uz reāla projekta „Kurzemes loks” (1. posms) piemēru, kur pieņemts, ka augstsprieguma elektrolīnu projekta izstrādē iesaistīti divi neatkarīgi uzņēmumi. Viens no šiem uzņēmumiem būvē 110 kV GEL, bet otrs – 330 kV GEL. Tādēļ lēmums jāpieņem, izvēloties tos variantus, kas ir izdevīgi katram no uzņēmumiem. Turklāt jāparāda arī projekta kapitālieguldījumi un iespējamā peļņa katram uzņēmumam gadījumā, ja izvēlas individuālu pieeju, īstenojot visu projektu atsevišķi, un jāpārlicinās, vai ir iespējams izveidot koalīciju. Tad seko nākamais uzdevums – izanalizēt iespējas veidot koalīcijas ar citiem energouzņēmumiem.

GEL trases reģionā pieņemtie klimatiskie apstākļi atbilst KL projektēšanas uzdevuma izejas datiem (sk. 4.1. apakšnodaļas 4.1.3. punktu), izņemot apledošanas sieniņas biezumu, kas šeit pieņemts 5 mm (pieņēmums priekšprojekta „Kurzemes loks” ietvaros).

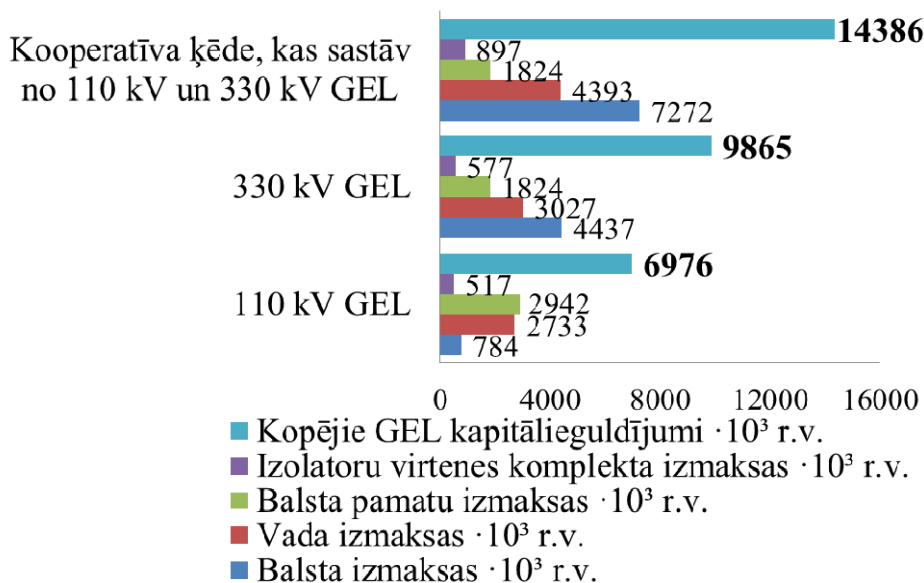
Ievērojot to, ka 110 kV GEL jānodrošina 1200 A slodzes strāva, savukārt 330 kV GEL – 2000 A, un balstoties uz KL 1. posma priekšprojekta izejas datiem, tika izvērtēti GEL kapitālieguldījumi trim pamatvariantiem:

1. vienķēdes 110 kV GEL ar tēraudalumīnija vadu *AS-240/32*; viena fāze sadalīta divos vados (*2xAS-240/32*), rezultātā šāds variants nodrošina 1210 A strāvu;

2. vienkādes 330 kV GEL ar vadu *AS-400/51*; fāze sadalīta trijos vados (*3xAS-400/51*) – 2475 A;
3. kooperatīva ķēde, kas sastāv no 110 kV GEL ar vadu *2xAS-240/32* – 1210 A; 330 kV GEL ar vadu *3xAS-400/51* – 2475 A.

Ekonomiskā salīdzinājuma nostādne atspoguļota 4.2.1. apakšnodaļas 4.2.1.3. punktā, kur galvenā ekonomiskā priekšrocība bija saistīta ar balstu skaita rezervi, tad balstu skaita aprēķins rāda, ka 1. variantam balstu skaits ir 861 gab.; 2. variantam – 534 gab.; 3. variantam – 534 gab. Otrajam un trešajam variantam balstu skaits ir vienāds, jo sakrīt GEL trase, kas izskaidrojams ar to, ka kooperatīvā ķēde, kura sastāv no divām 110 kV un 330 kV GEL elektriskām ķēdēm, ir izvietota uz vieniem un tiem pašiem balstiem: vienā pusē ir 110 kV GEL ķēde, bet otrā pusē – 330 kV GEL ķēde. Galvenā atšķirība ir balstu tips, kas izvēlēts atkarībā no vada slodzes uz balstu. Pirmajam variantam tika izvēlēts PB-110-4 tipa balsts, otrajam variantam – P330-3 tipa balsts, bet trešajam variantam – P330-2 tipa balsts.

Katram variantam aprēķinājām aplūkojamās GEL kapitālieguldījumus kā galveno ekonomiskās efektivitātes rādītāju (sk. 4.19. att.).



4.19. att. GEL kapitālieguldījumi atbilstoši izvēlētajam variantam

Analizējot iegūtos rezultātus, var secināt sekojošo [92]:

- I. ja pastāv GEL projekta realizācijas individuālā pieeja, kad būvuzņēmums A būvē pats savu 110 kV GEL, bet būvuzņēmums B – savu 330 kV GEL (sk. 4.19. att.), kopējie GEL kapitālieguldījumi, kādi nepieciešami katram no uzņēmumiem, vadoties pēc individuālas uzvedības principa, sniegti 4.8. tabulā;

4.8. tabula

GEL kapitālieguldījumi individuālas uzvedības gadījumā

Uzņēmums	Investīcijas, r.v.
A	6976000
B	9865000
Kopējie kapitālieguldījumi A un B	16841000

II. ja notiek GEL projekta realizācija ar pārrunām par koalīcijas organizēšanu no diviem uzņēmumiem un papildu peļņas sadali ar Šeplija vērtības izmantošanu, kam nepieciešama abu uzņēmumu piekrišana un akcepts, veidojas būvuzņēmumu A un B koalīcija (divi uzņēmumi, kas sadala papildu peļņu uz pusēm), un šajā gadījumā kooperatīvā 110 kV un 330 kV GEL ķēde izvietota uz vienas GEL trases (sk. 4.19. att.). Rezultātā nepieciešamie kopējie GEL kapitālieguldījumi abiem uzņēmumiem kooperatīvas uzvedības gadījumā uzrādīti 4.9. tabulā.

4.9. tabula

GEL kapitālieguldījumi kooperatīvās uzvedības gadījumā

	Investīcijas, r.v.
Uzņēmumu A un B koalīcija	14386000
Katra uzņēmuma papildus iegūtā peļņa	1227500
Kopējā papildu peļņa uzņēmumiem A un B	2455000

Ir acīmredzami, ka kooperatīvas uzvedības gadījumā GEL projekta investīcijas ievērojami samazinās. Tas nozīmē, ka šādas koalīcijas izveide ir racionāla, ekonomiski pamatota un iespējama no investīciju ietaupījuma viedokļa. Vērts atzīmēt, ka reālajā projektā peļņa mērāma desmitos miljonu EUR.

4.4. Secinājumi

1. Iegūtie augstsprieguma elektrolīniju optimizācijas paņēmieni rezultāti balstās, pirmkārt, uz reāla projekta „Kurzemes loks” (1. posms) piemēru, kas ietver 330/110 kV GEL izbūvi, otrkārt, uz esošā elektropārvades tīkla GEL piemēriem.
2. Izmantojot augsttemperatūras vadus ar kompozītmateriāla serdeni (HTLS tipa vadi) tradicionālā tipa vadu (ACSR) vietā, tika pamatota šāda optimizācijas risinājuma efektivitāte.

3. Augsttemperatūras vadu izmantošanas perspektīvas un iespējas varētu būt ekonomiski vēl pamatotākas, ja HTLS tipa vadu cena tiktu samazināta.
4. Piedāvātā GEL daudzkritēriju optimizācijas metode, kas ir daļēji balstīta uz stohastiskās pieejas un spēļu teorijas kritērijiem ar Pareto un scenāriju pieejas izmantošanu, ļāva izvēlēties vispiemērotāko alternatīvu GEL projekta realizācijai, ņemot vērā visvairāk ietekmējošā ierobežojuma neievērošanas pieļaujamību, bet ar nosacījumu par pastāvīgas GEL ekspluatācijas un monitoringa nepieciešamību.
5. Galīgais lēmums balstās uz varbūtību, ar kādu var realizēties viena no izvēlētajām GEL projekta īstenošanas alternatīvām, ievērojot nosacījumu, ka jāizvēlas alternatīva ar vismazāko varbūtības vērtību.
6. Piedāvātā GEL kapitālieguldījumu sadales metode uzrādījusi lielisku rezultātu, panākot GEL būvuzņēmumu kooperatīvas uzvedības gadījumā augstu peļņu.

5. SECINĀJUMI UN REKOMENDĀCIJAS TURPMĀKAM DARBAM

5.1. Kopējie secinājumi

1. GEL loma mūsdienu enerģētikā strauji pieaug, jo tiek paredzēta elektropārvades tīkla attīstība gan starptautiskā, gan nacionālā mērogā, tādējādi, no vienas puses, būs nepieciešams paplašināt esošā tīkla elektriskos savienojumus, būvējot jaunas GEL ar ievērojamu caurlaides spēju, no otras puses, šo problēmu risināšanu būs iespējams realizēt, izstrādājot un ieviešot esošajā elektrotīklā jaunas tehnoloģijas (piemēram, GEL termiskās slodzes strāvas monitoringa sistēmas, HTLS tipa vadu izmantošana), kas ļauj optimizēt GEL darbību, ekspluatāciju un vadību.
2. Lai varētu atrisināt GEL optimizācijas uzdevumu, jāievēro EPL īpatnējās konstrukcijas un parametri, kas formē to mehāniskos, termiskos un vides ietekmes ierobežojumus, tā rezultātā sasniedzot tehniski un ekonomiski pamatotu optimālo GEL projekta risinājumu tās praktiskajai realizācijai.
3. GEL projektēšanas gaitā jāizmanto moderni datorprogrammu nodrošinājuma kompleksi; piemēram, šajā darbā izmantoti *PLS-CADD* un *SAPR LEP*, kas ļauj veikt nepieciešamos aprēķinus un atbilstošo analīzi precīzi, kvalitatīvi, ekonomiski efektīvi un ātri, izpildot visas GEL projektēšanas uzdevumu izvirzītās pamatprasības.
4. Ievērojot jaunākās tendences energosistēmu attīstībā, kas būtiski ietekmē pārvades elektrotīkla plānošanas un attīstības procesu, rodas nepieciešamība pēc jaunām GEL optimizācijas pieejām, kas ļaus atvieglot lēmumu pieņemšanas procesu GEL projektēšanas optimizācijas uzdevumos, rezultātā samazinot ieguldīto investīciju apjomu un jaudas zudumus, kā arī uzlabojot sistēmas drošumu un palielinot pārvadāmās elektroenerģijas kvalitāti.
5. Lai atrisinātu GEL projektēšanas optimizācijas problēmu, tiek formulēts daudzkritēriju optimizācijas uzdevums, kas ievēro lielu stāvokļa un lēmumu mainīgo skaitu, kā arī gadījuma un nenoteikto parametru iespējamo ietekmi.
6. Darbā piedāvātā GEL daudzkritēriju optimizācijas metode, kas daļēji balstīta uz stohastisko pieeju un spēļu teorijas kritērijiem, ļauj apsvērt pat alternatīvas, kurās tiek pārkāpts visietekmējošākais ierobežojums, bet kuras, piemērojot dažus papildu pasākumus, var būt ekonomiski visizdevīgākais GEL projektēšanas risinājums.

7. Pierādītā GEL daudzkritēriju uzdevuma atrisināšanas pieejas izmantošanas racionalitāte balstās uz „Kurzemes loka” 1. posma projekta piemēru, rezultātā var secināt, ka piedāvātā metode, izmantojot Pareto lēmumu kopas izdalīšanu, ļauj novērtēt ietekmes uz vidi indikatoru uzlabošanas izmaksas un sekmē pamatotus lēmumus.
8. Darbā veikta termiskās slodzes strāvas aplēses metožu pārbaude, balstoties uz tiešu (eksperimentālie dati) un netiešu (aprēķina dati) GEL galveno parametru monitoringu, salīdzinot mērījumos un aprēķinos noteiktās vadu temperatūras un nokares vairākos esošo GEL darbības režimos pie konkrētiem laika apstākļiem, lai noteiktu pieļaujamās slodzes strāvas vispiemērotāko (precīzāko) aplēses metodi (no termiskā viedokļa).
9. Vairāku GEL pieļaujamās slodzes strāvas monitoringa sistēmas verifikācijas modeļu analīzes rezultātā noskaidrojās vispiemērotākā metode – MT 34-70-037-87, tādējādi, izmantojot šīs metodes teorētisko bāzi, tika noteikta pieļaujamā vada temperatūra un slodzes strāva, balstoties, pirmkārt, uz mērījumu rezultātiem, otrkārt, uz skaitļošanas aprēķinu rezultātiem;
10. Rezultātā darbā tiek piedāvāts sintezēts GEL pieļaujamās slodzes strāvas monitoringa algoritms, kura darbība balstās uz verifikācijas rezultātu pamatojumu dažādiem GEL piemēriem, ievērojot termiskos, mehāniskos un apkārtējās vides ierobežojumus.
11. Piedāvātā algoritma izmantošana ļauj uzlabot pieļaujamās slodzes strāvas aplēses precizitāti pastāvošām vai projektējamām GEL, kā arī noteikt slēpto slodzes strāvas rezervi (GEL iespējamā papildu gabarīta novērtēšana), rezultātā sniedzot iespēju ievērojami palielināt GEL pārvadāmo jaudu, nosakot precīzu GEL pieļaujamo vada temperatūru pie konkrētiem laika apstākļiem. Turklāt faktisko vadu temperatūras datu izmantošana ļautu regulēt GEL pieļaujamo slodzes strāvu elastīgākā veidā, pielāgojoties dinamiski operatīvai augstsprieguma elektrolīniju kontrolei un vadībai reālā laikā režīmā un sniedzot jaunas iespējas viedā tīkla integrēšanai.
12. Izmantotā sintezētā GEL pieļaujamās slodzes strāvas monitoringa algoritma pierādītā tehniskā efektivitāte dažādu problēmu izskatīšanā ļauj samazināt kopējo investīciju apjomu esošo GEL rekonstrukcijā, kļūstot par ekonomiski pamatotu risinājumu esošā elektropārvades tīkla uzlabošanai.

13. Jaunu tehnoloģiju integrēšana, piemēram, augsttemperatūras vadu ar kompozītmateriāla serdeni (HTLS tipa vadi) izmantošana, ir efektīvs tehniski ekonomisks perspektīvais risinājums, modernizējot esošās GEL.
14. Piedāvātais risinājums ir aprobēts, izmantojot praktiskā pielietojumā gan projekta „Kurzemes loks” (1. posms), gan esošā Latvijas elektropārvades tīkla GEL piemērus, analizējot HTLS un ACSR tipa vadu tehniskajā un ekonomiskajā salīdzinājumā iegūtos rezultātus, ievērojot GEL mehāniskos un termiskos ierobežojumus. Turklāt šis risinājums varētu būt ekonomiski vēl pamatotāks, ja HTLS tipa vadu cena tiktu samazināta.
15. Metodes, kas balstās uz spēļu teoriju un tās kritērijiem, var palīdzēt pieņemt pareizo lēmumu par elektroenerģijas pārvades un enerģijas piegādes avotu attīstību.
16. Kooperatīvo spēļu teoriju piemēro dažādu enerģētisko uzdevumu risināšanai, kur neatkarīgi energouzņēmumi var iegūt augstu peļņu, veidojot veiksmīgu koalīciju ar citiem tirgus dalībniekiem.
17. Piedāvāta sintezēta GEL kapitālieguldījumu sadales metode ir aprobēta, izmantojot praktiskā pielietojumā projekta „Kurzemes loks” (1. posms) GEL piemēru. Darbā iegūtie rezultāti pamatoja GEL projekta iesaistīto energouzņēmumu koalīcijas izveides racionalitāti un iespējamās no investīciju ietaupījuma viedokļa ekonomiskās priekšrocības.

5.2. Rekomendācijas turpmākam darbam

Piedāvātie esošo un projektējamo augstsprieguma elektrolīniju optimizācijas paņēmieni it īpaši aktualizējas pašreizējā enerģētikas nozares situācijā, kad energosistēmu attīstība tiek veicināta, pielāgojoties viedo tīklu koncepciju uzdevumiem. Līdz ar to, ievērojot vispārīgi pieņemtās nākotnes vīziju tendences enerģētikā, galvenokārt saistībā ar GEL attīstības un uzlabošanas tehniski ekonomiskajiem risinājumiem (optimizācijas paņēmieniem), turpmākajā darbā par mērķi nepieciešams izvirzīt sekojošo izklāstīto uzdevumu attīstību un modernizāciju.

1. Modernizēt izstrādāto GEL projektēšanas optimizācijas algoritmu, kas pamato GEL projektēšanas daudzkriteriālo uzdevuma nostādni ar Pareto pieejas un scenāriju pieejas izmantošanu galīgā lēmuma pieņemšanai, ieviešot to datorprogrammas realizācijā;

2. Attīstīt sintezēto GEL pieļaujamās slodzes strāvas monitoringa sistēmu/terminālu (no termiskā viedokļa), ieviešot papildu aprēķina blokus algoritmā, kas ievērotu esošo GEL vadu nomaiņu ar augsttemperatūras vadiem, tādējādi paplašinot vada pieļaujamo temperatūru un slodzes strāvu vērtību robežas, papildus izvērtējot darba un avārijas režīmu rašanās varbūtību pie noteiktajiem klimatiskajiem apstākļiem;
3. Izvērtēt šādu GEL pieļaujamās slodzes strāvas monitoringa sistēmu/terminālu izvietojuma nepieciešamības gadījumus esošā elektropārvades tīklā „šaurajās” vietās, kas ļautu minimizēt kapitālieguldījumus izmantojamo augstsprieguma elektrolīniju rekonstrukcijā;
4. Novērtēt prognozējamās klimata izmaiņas ietekmi uz Latvijas augstsprieguma elektrolīniju caurlaides spēju.

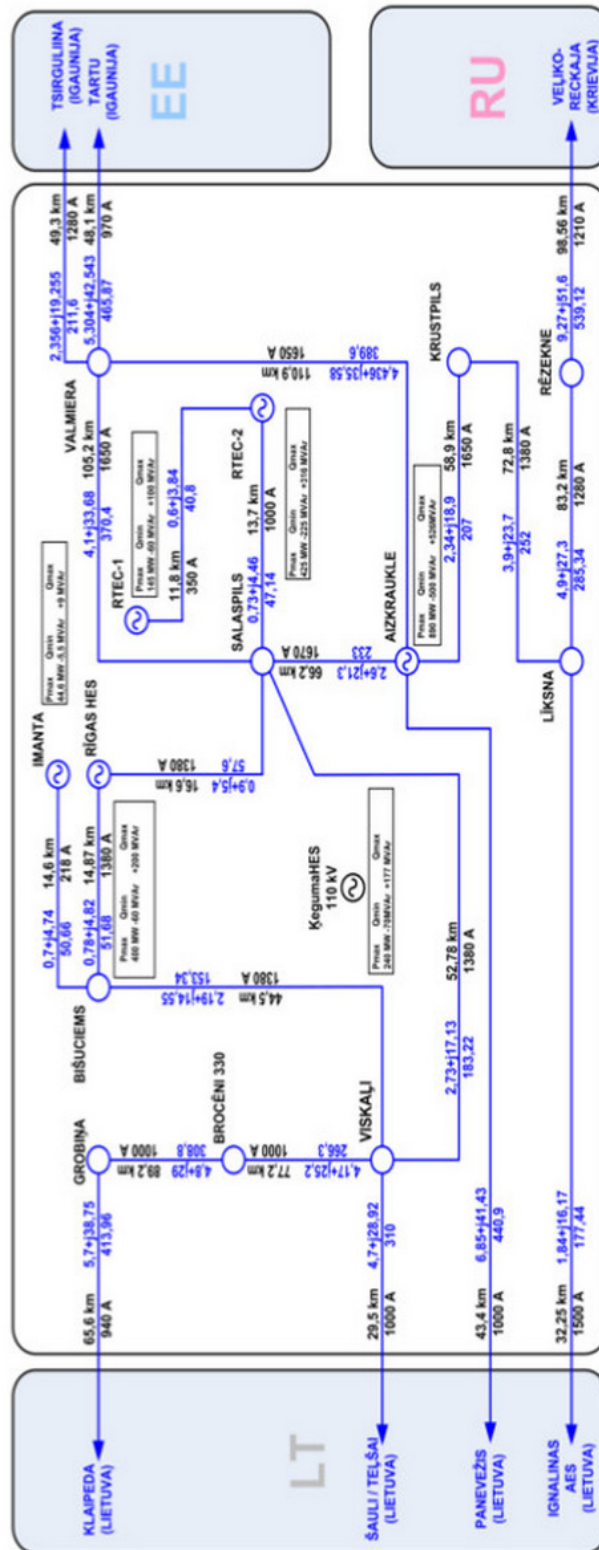
PIELIKUMI

Starptautisko starpsavienojumu raksturojumi, kas iekļauti BRELL gredzenā

N.p.k.	GEL spriegums, kV	GEL nosaukums
1.	330	Pskov (Krievija) – Tartu (Igaunija)
2.	330	Kingiseppskaya (Krievija) – Estonian PS (Igaunija)
3.	330	Leningradskaya (Krievija) – Balti (Igaunija)
4.	330	Velikoretskaya (Krievija) – Rezekne (Latvija)
5.	330	Tartu (Igaunija) – Valmiera (Latvija)
6.	330	Tsirguliina (Igaunija) – Valmiera (Latvija)
7.	330	Jelgava (Latvija) – Siauliai/Telsiai (Lietuva)
8.	330	Panevezys (Lietuva) – Plavinu HES (Latvija)
9.	330	Klaipeda (Lietuva) – Grobiņa (Latvija)
10.	330	Ignalinas AES (Lietuva) – Līksna (Latvija)
11.	330	ViLNr.iaus (Lietuva) – Molodechno (Baltkrievija)
12.	330	Alitus (Lietuva) – Grodno (Baltkrievija)
13.	330	Polotsk (Baltkrievija) – Ignalinas AES (Lietuva)
14.	330	Ignalinas AES (Lietuva) – Smorgon (Baltkrievija)
15.	330	Ignalinas AES (Lietuva) – Minskaja TES-5 (Baltkrievija)
16.	330	Bitenai (Lietuva) – Sovietsk №1 (Krievija)
17.	330	Bitenai (Lietuva) – Sovietsk №2 (Krievija)
18.	330	Kruonio (Lietuva) – Sovietsk (Krievija)
19.	330	Polotsk (Baltkrievija) – NovosokoLNr.iki (Krievija)
20.	330	330 kV Vitebsk (Baltkrievija) – Talashkino (Krievija)
21.	330	Roslavl (Krievija) – Krichev (Baltkrievija)
22.	750	Smolenskaya AES (Krievija) – Beloruskaya (Baltkrievija)

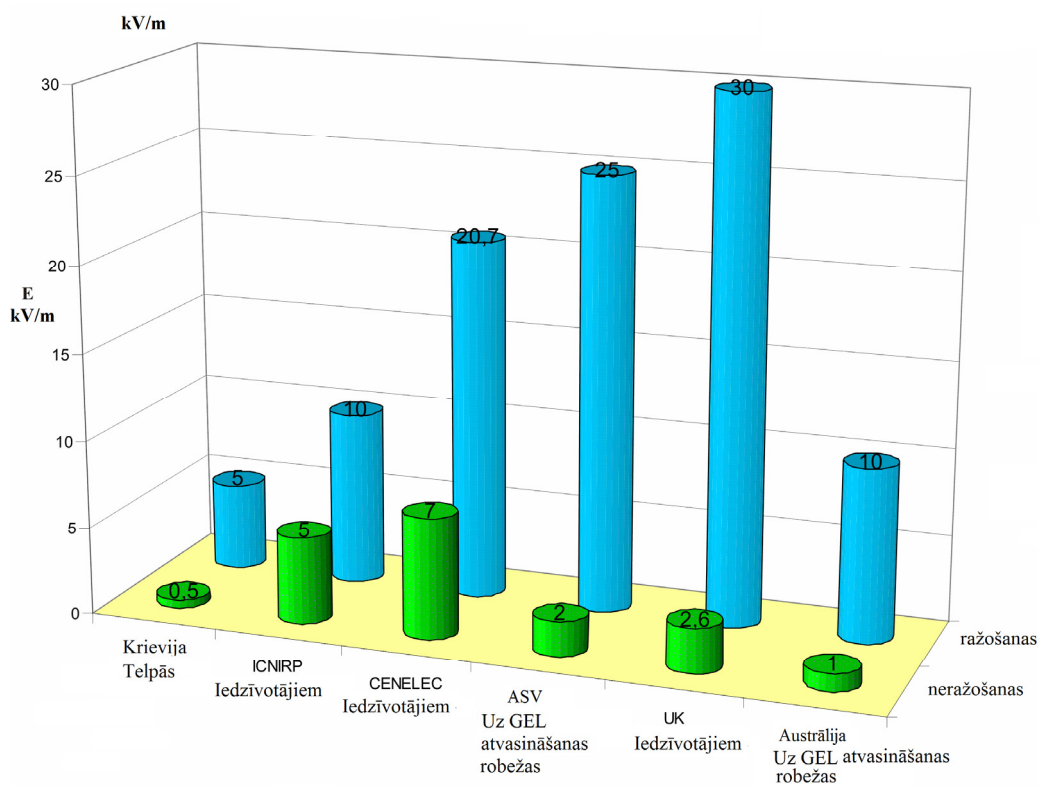
2. pielikums

Vispārējā shēma kopējās pārvades jaudas un maksimāli pieļaujamās strāvas lieluma aprēķināšanai

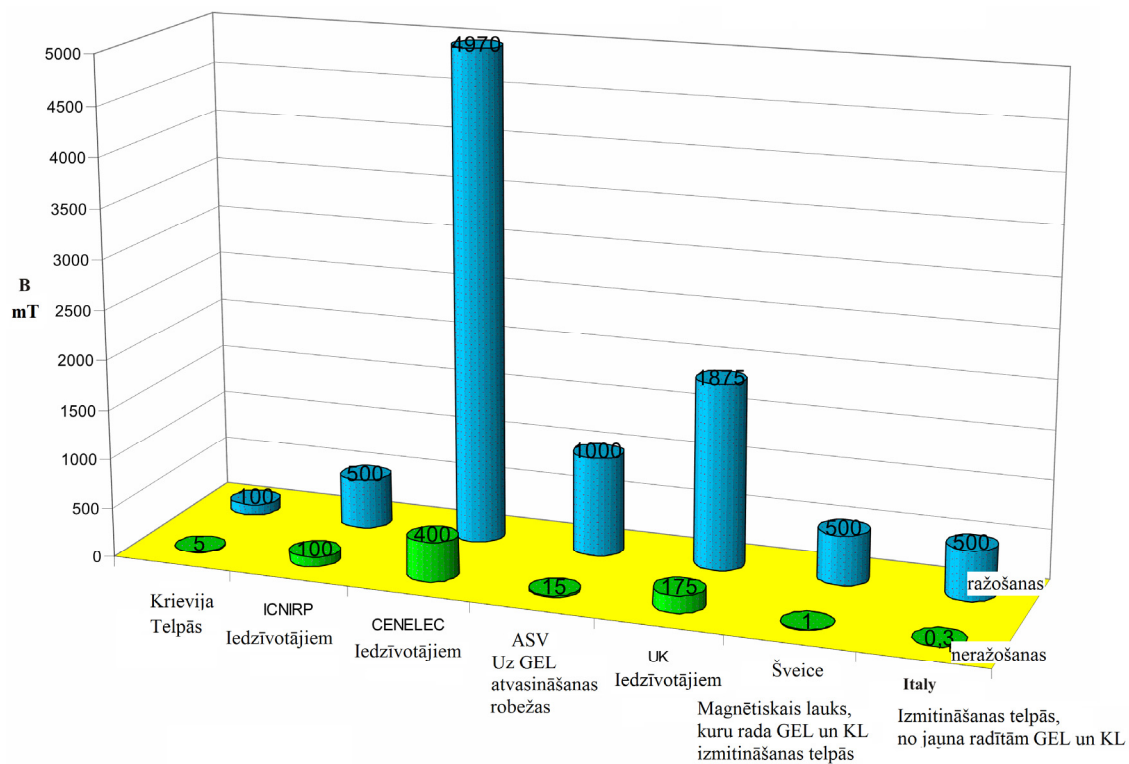


3. pielikums

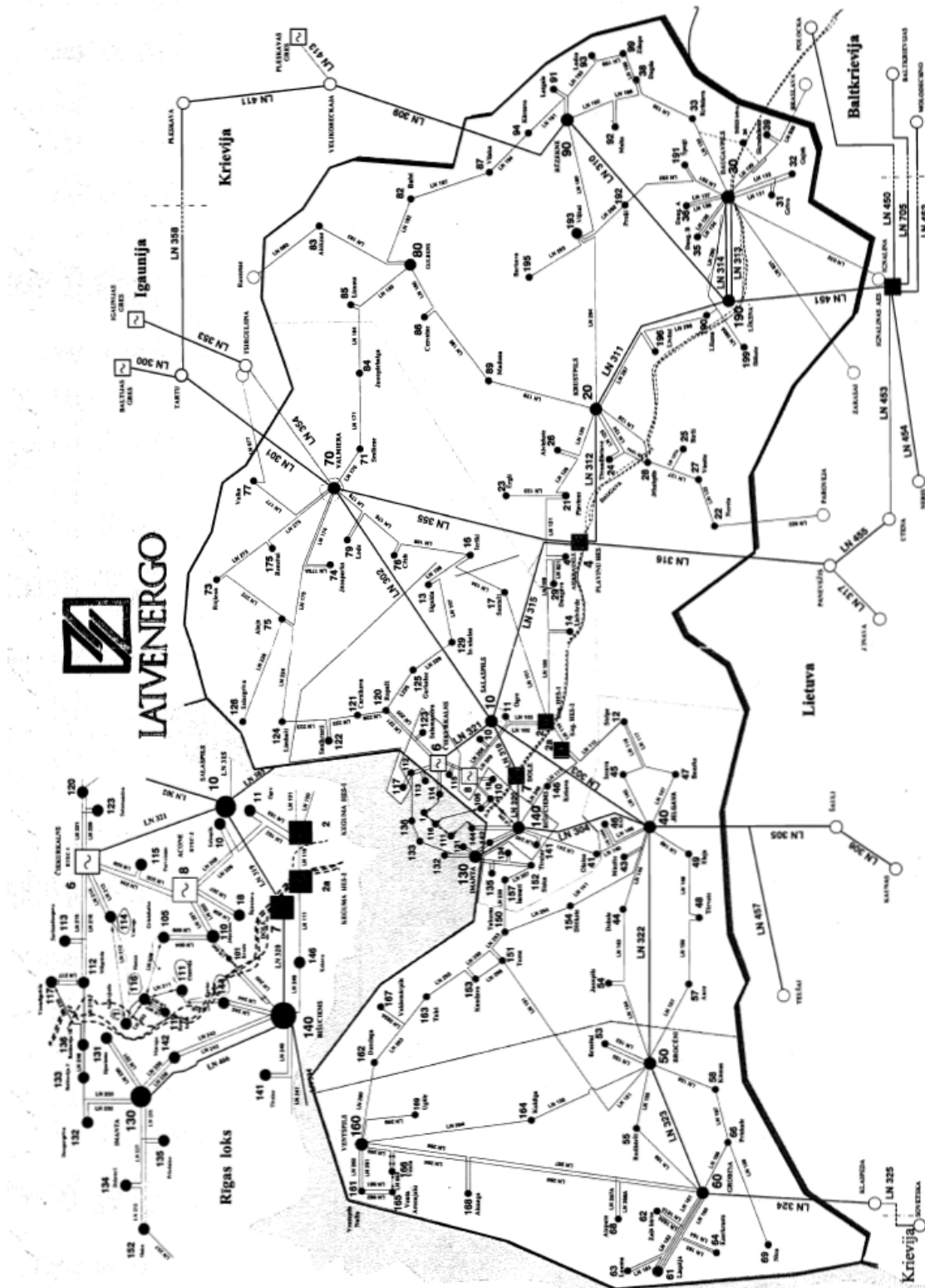
EL intensitātes higiēnas standartlielumi pie frekvences 50 Hz



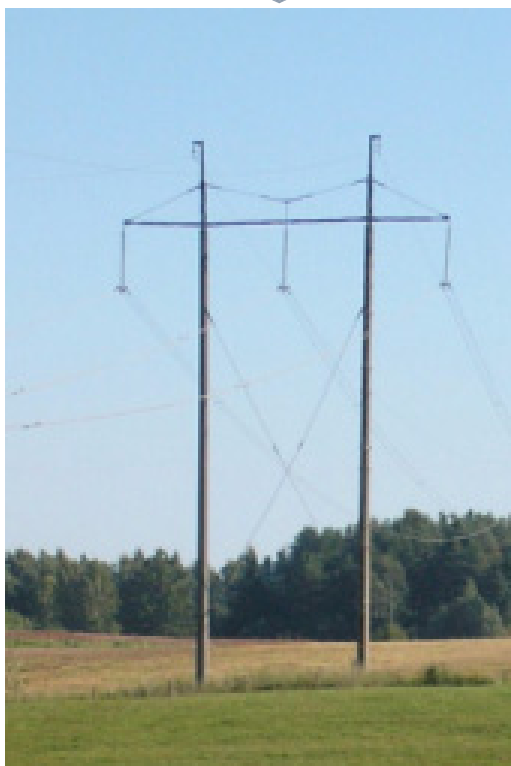
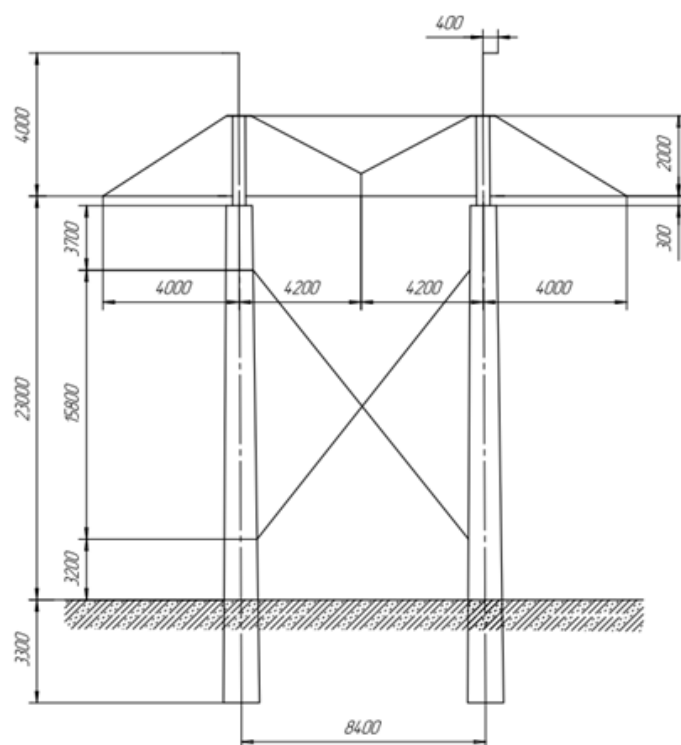
ML indukcijas higiēnas standartlielumi pie frekvences 50 Hz



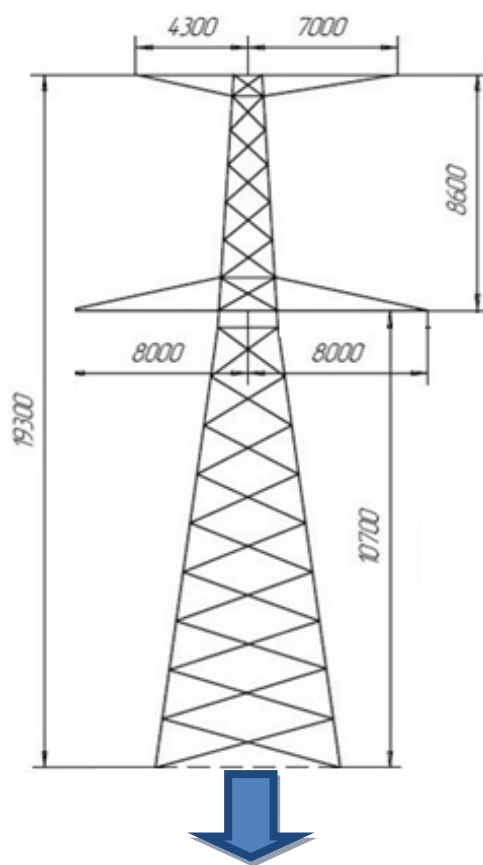
Esošo Latvijas elektropārvades tīkla augstsprieguma elektrolīniju izvietojuma plāns



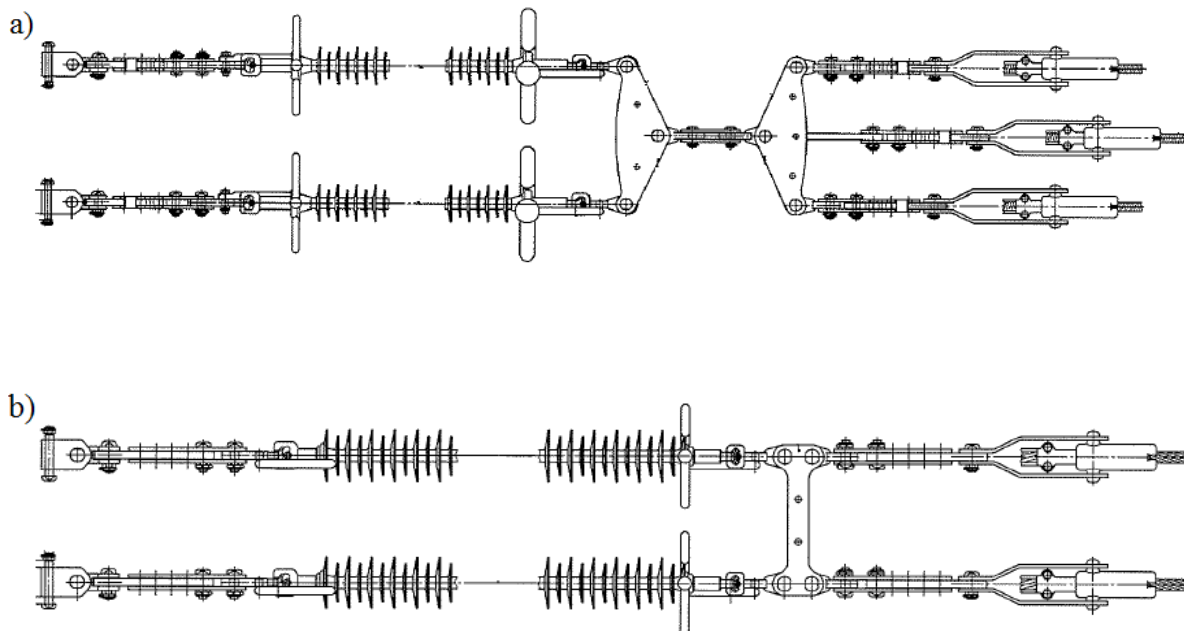
Esošās GEL LNr. 309 *PB 330-3* starpbalsts



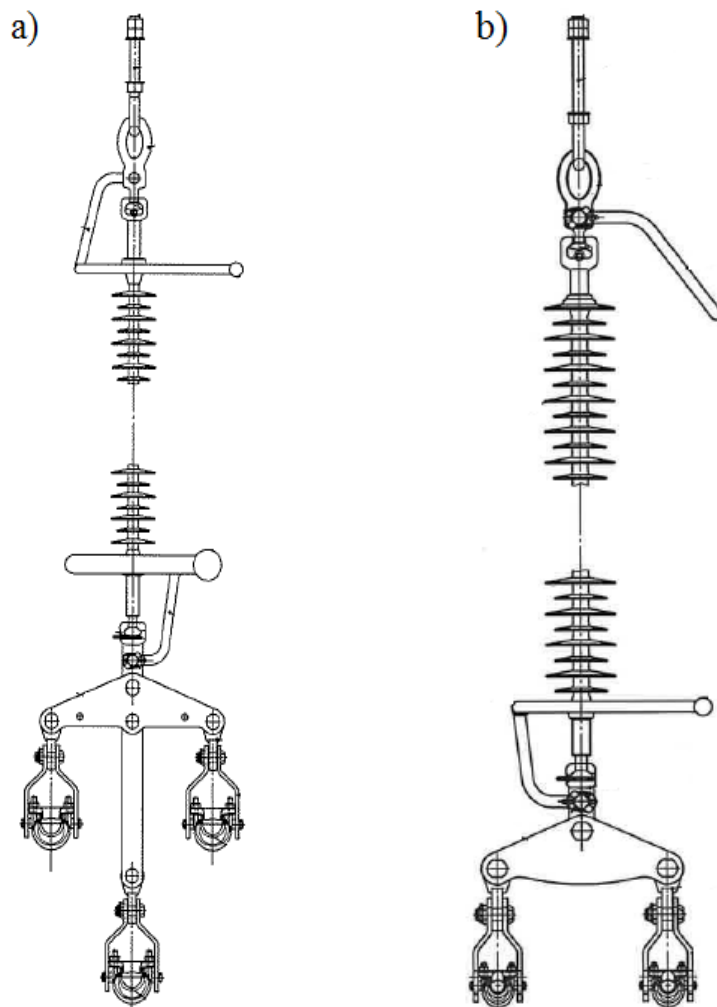
Esošās GEL LNr. 309 *U 330-3* enkurbalsts



Divķēžu atsejvīrtene: a) ACSR 402/52 tipa vadam 330 kV pusē; b) ACSR 242/39 tipa vadam 110 kV pusē

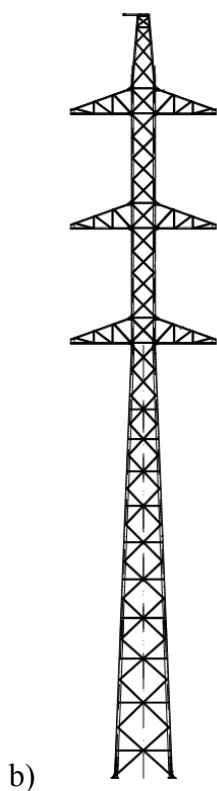
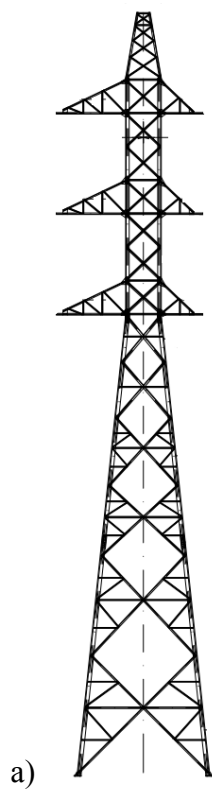


Vienķēžu piekarvirtene: a) ACSR 402/52 tipa vadam 330 kV pusē; b) ACSR 242/39 tipa vadam 110 kV pusē

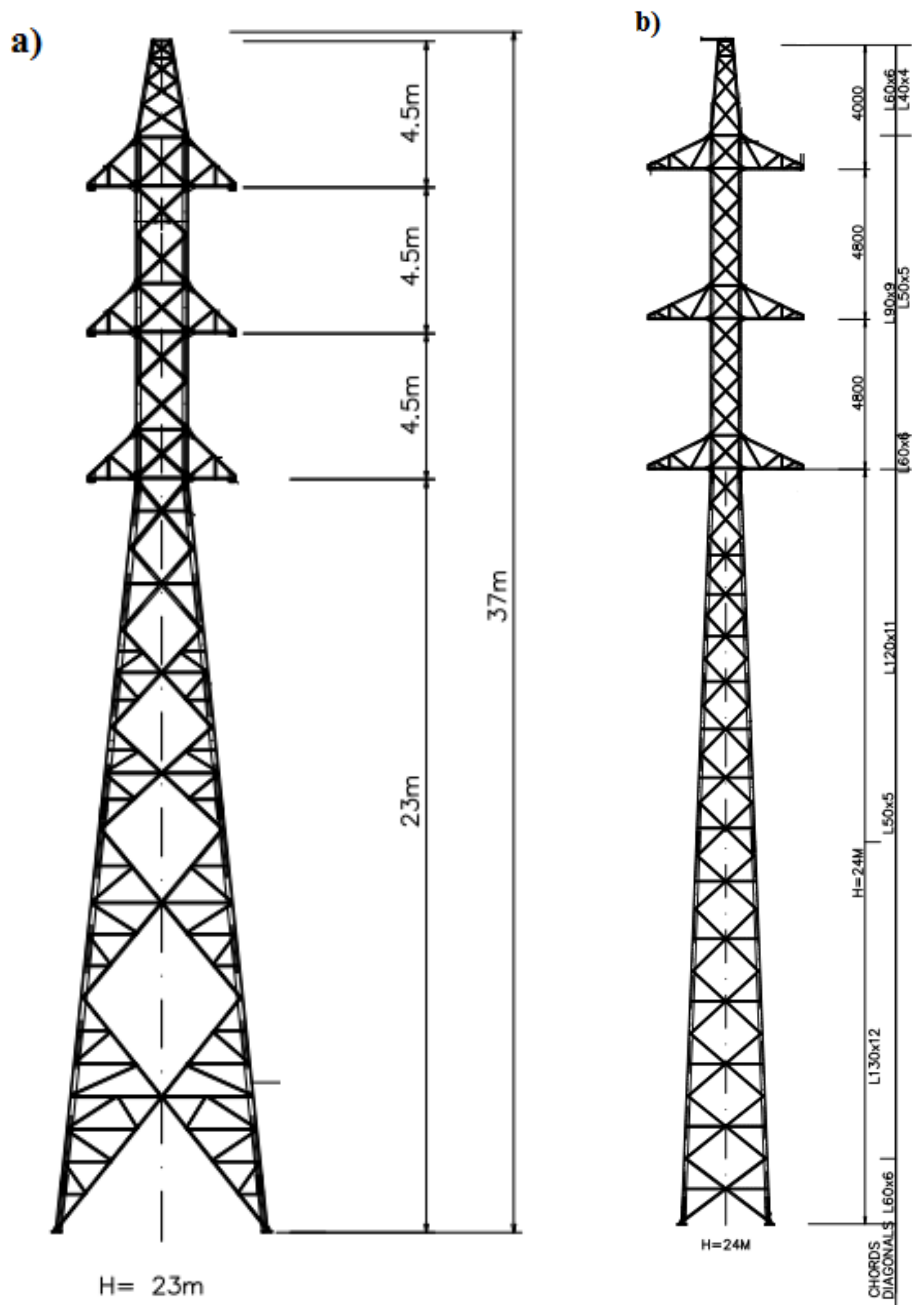


Projektējamās 110 kV GEL nozares uz a/st. „Alsunga” un uz a/st. „Aizpute” balsti:

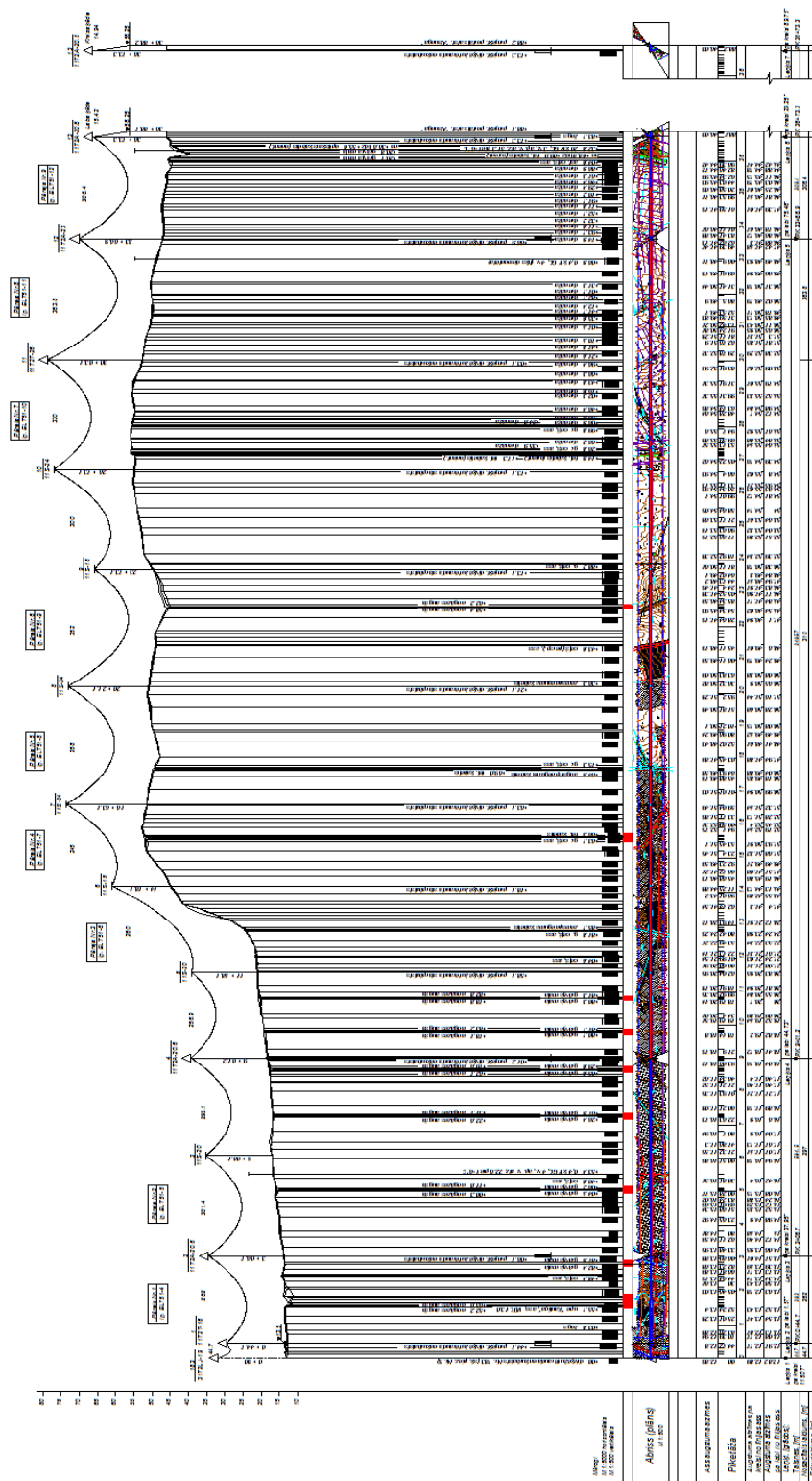
a) enkurbalsts; b) starpbalsts



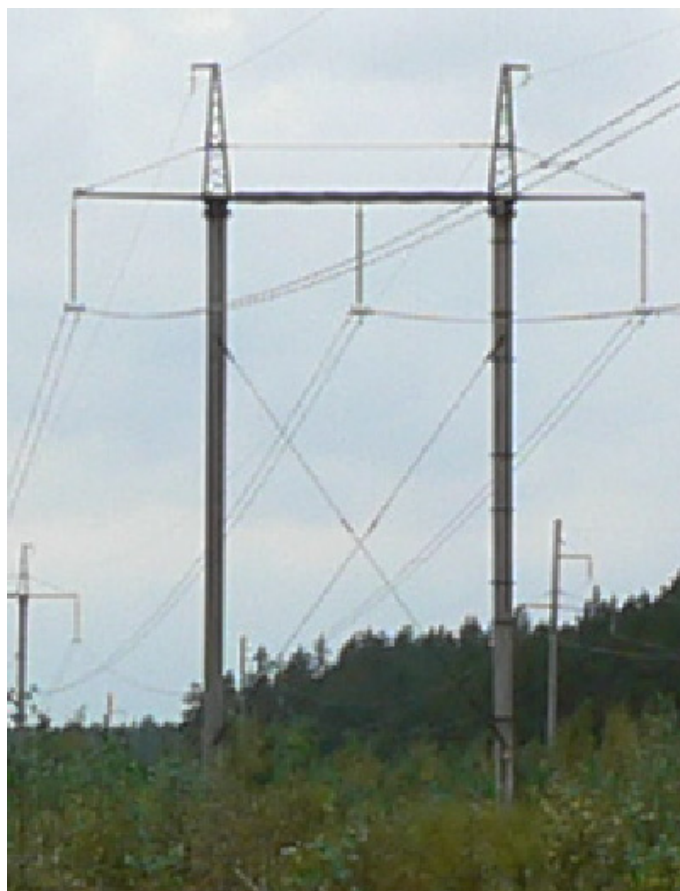
Projektējamās 330/110 kV GEL balsti atbilstoši „Kurzemes loka” priekšprojekta versijai:
a) enkurbalsts (AT110-2); b) starpbalsts (S110-2)



Projektējamās 110 kV GEL nozares uz a/st. „Alsunga” garenprofila piemērs



Esošās 330 kV GEL LNr. 355 *PVS-330A* starpbalsts



LITERATŪRA

1. Aizsargjoslu likums / Internets. - <http://likumi.lv/doc.php?id=42348>
2. Berjozina S., Bargels V., Sauhats A., Vanzovichs E. Elektropārvades līniju vadu ar kompozītmateriālu serdeni izmantošanas iespēju salīdzinošs vērtējums// Scientific Journal of Riga Technical University. - 2011. - Vol.28. - pp. 13.-18.
3. Enerģētikas attīstības pamatnostādnes 2007. - 2016. gadam / Internets. - http://www.rea.riga.lv/files/LR_%20Energetikas_pamatnostadnes_2007-2016.pdf
4. Engēlis A., Arājs R. Augstspriegumu elektriskās līnijas, 2004.
5. Enerģētikas likums / Internets. - <http://likumi.lv/doc.php?id=49833>
6. Elektroenerģijas tirgus likums / Internets. - <http://likumi.lv/doc.php?id=108834>
7. Enerģētikas stratēģija 2030 (Projekts, 14122011) / Internets. - [http://www.em.gov.lv/images/modules/items/14122011_Energetikas_strategija_2030\(1\).pdf](http://www.em.gov.lv/images/modules/items/14122011_Energetikas_strategija_2030(1).pdf)
8. Galvenās dilemmas, pretrunas un riski. / Internets. - <http://energetika-lv.wikidot.com/8-galvenas-dilemmas-pretrunas-un-riski>
9. Krišāns Z., Oļeņikova I. Elektroenerģētisko uzņēmumu vadības pamati. - Rīga: RTU, 2007. - 157 lpp.
10. Kurzemes loks / Internets. - http://www.ast.lv/lat/par_ast/parvades_tikls/kurzemes_loks/
11. Latvijas energostandarts LEK 002, Energoietaišu tehniskā ekspluatācija / Internets. - http://www.latvenergo.lv/files/text/energostandarti/LEK_002.pdf
12. Latvijas energostandarti / Internets. - http://www.let.latvenergo.lv/portal/page/portal/Latvian/LET/LET/latvijas_elektriskie_tikli/NO_RMATIVIE_DOKUMENTI/dokumenti/
13. Noteikumi par Latvijas būvnormatīvu LBN 262-05 „Elektronisko sakaru tīkli” / Internets. - <http://likumi.lv/doc.php?id=132352>
14. Noteikumi par ārējo inženierkomunikāciju izvietojumu pilsētās, ciemos un lauku teritorijās / Internets. - <http://likumi.lv/doc.php?id=98765>
15. Noteikumi par Latvijas būvnormatīvu LBN 003-01 „Būvklimatoloģija” / Internets. - <http://likumi.lv/doc.php?id=53424>
16. Sauhats A., Vempers G., Inde J., Tereskina I. Spēļu teorija energoapgādes plānošanas uzdevumā// Enerģija un pasaule. - 2008. - Nr.2. - 76.-79. lpp.
17. Tīkla kodekss / Internets. - <http://likumi.lv/doc.php?id=257943>
18. Timmermanis K., Rozenkrons J. Elektrisko staciju un apakšstaciju elektriskā daļa. - Rīga: Zvaigzne, 1988. - 502. lpp.
19. Vanags A. Elektriskie tīkli un sistēmas I daļa. - Rīga: RTU, 2002. - 479 lpp.
20. Vasiļjeva L. Vides ekonomikas būtība, 1. daļa. - Rīga: RTU, 1998. - 42. lpp
21. Vanaga D. Maģistra darbs. Investīciju analīze un novērtēšana / Internets. - http://www.nasdaqomxbaltic.com/files/riga/Studiju_darbi/Dace_Vanaga_mag.pdf
22. Vempers G. Energosistēmu attīstības projektu izvērtēšana brīvā tirgus ekonomikas apstākļos. Promocijas darbs, 2013.
23. Vanzovičs E., Berjozina S. Mācību metodiskie norādījumi: Elektriskās slodzes. - Rīga: RTU, 2012. - 36. lpp.
24. Zariņš I. Enerģētikas attīstības scenāriji un likumdošanas iniciatīvu sagaidāmā ietekme uz nozares un tautsaimniecības attīstību / Internets. - http://www.latvenergo.lv/portal/page/portal/Latvian/files/konference/Zarins_11_05_2011_konference_Ipanelis.pdf

25. Žogots A., Berjozka S., Vanzovičs E. Gaisvadu elektrolīniju projektēšanas datorprogrammu apraksts / Internets. - http://www.rtu.lv/component/option,com_docman/task,doc_download/gid,7724/konferences-materiali-studentu.pdf
26. Abbate A. L', Migliavacca G., Pagano T., Vafeas A. Advanced transmission technologies in Europe: a roadmap towards the Smart Grid evolution// Proceedings of the IEEE PES Trondheim PowerTech 2011 Conference. - Trondheim, Norway: IEEE PES, 2011. - 8. p.
27. ABB. Phase shifting transformers. Reliable and efficient power flow control / Internets. - [http://www05.abb.com/global/scot/scot252.nsf/veritydisplay/2eee6e01c1e2a30583257984002ce047/\\$file/pst_low%20res.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot252.nsf/veritydisplay/2eee6e01c1e2a30583257984002ce047/$file/pst_low%20res.pdf)
28. Adamec M., Indráková M., Karajica M. The European Electricity Market and Cross-Border Transmission// Acta Pplytechnica. - 2008. - Vol.48. (No.3) - pp. 20-25.
29. Albizu I., Fernandez E., Mazon A. J., Bengoechea J., Torres E. Hardware and software architecture for overhead line rating// Proceedings of the IEEE PES Trondheim PowerTech 2011 Conference. - Trondheim, Norway: IEEE PES, 2011. - 6. p.
30. Bevanger K., Bartzke G., Brøseth H., Dahl E.L., Gjershaug J.O., Hanssen F., Jacobsen K. O., Kvaløy P., May R., Meås R., Nygård T., Refsnæs S., Stokke S., Thomassen J. Optimal design and routing of power lines; ecological, technical and economic perspectives (OPTIPOL). Progress Report – NINA Report 762, 2011, 52. p.
31. Berjozka S., Bargels V., Sauhats A., Vanzovičs E. Elektropārvades līniju vadu ar kompozītmateriālu serdeni izmantošanas iespēju salīdzinošs vērtējums// Scientific Journal of Riga Technical University. - 2011. - Vol.28. - pp. 13.-18.
32. Berjozka S., Sauhats A., Bargels V., Vanzovičs E. Detecting the Capacity Reserve in an Overhead Line// International Journal of Electrical, Electronic Science and Engineering. - 2012. - Vol.61. - pp. 327-332.
33. Berjozka S., Sauhats A., Vanzovičs E. Simulations of the Allowable Load Current of the Overhead Lines in the Latvian Power Network// Journal of Energy and Power Engineering (JEPE). - 2012. - Vol.6. (No.9). - pp. 1521-1526.
34. Berjozka S., Sauhats A., Banga A., Jakusevics I. Evaluation of Thermal Rating Methods Based on the Transmission Line Model// Latvian Journal of Physics and Technical Sciences. - 2013. - Vol.50 (No.4). - pp. 22-33.
35. Berjozka S., Sauhats A., Vanzovičs E. Evaluation of the Profitability of High Temperature Low Sag Conductors // Scientific Journal of Riga Technical University. - 2013. - Vol.31. - pp. 18.-24.
36. Beryozkina S., Sauhats A., Vanzovičs E. Mechanical and Thermal Limitations of the Load Current of the Transmission Line // Proceedings of the 6th International Conference on Electrical and Control Technologies ECT 2011. - Kaunas, Lithuania: Kaunas University of Technology, 2011. - pp. 336-340.
37. Beryozkina S., Sauhats A., Vanzovičs E. Modeling of the load current of the transmission line// Proceedings of the 10th International Conference on Environment and Electrical Engineering IEEEIC 2011. - Rome, Italy: IEEE, 2011. - pp. 911-914.
38. Beryozkina S., Sauhats A., Vanzovičs E. Climate Conditions Impact on the Permissible Load Current of Transmission Line// Proceedings of the IEEE PES Trondheim PowerTech 2011 Conference. - Trondheim, Norway: IEEE PES, 2011. - 6. p.
39. Berjozka S., Bargels V., Sauhats A., Vanzovičs E. A Comparative Assessment of Conductors with Composite Core// Abstract Book and Electronic Proceedings of the 52nd Annual International Scientific Conference of Riga Technical University. - Riga, Latvia: RTU, 2011. - 6. p.

40. Berjozkina S., Sauhats A., Bargels V., Vanzovichs E. High Temperature Low Sag Conductors as Method for the Improvement of Electrical Transmission Lines// Proceedings of the 7th International Conference on Electrical and Control Technologies ECT 2012. - Kaunas, Lithuania: Kaunas University of Technology, 2012. - pp. 200-205.
41. Berjozkina S., Sauhats A., Bargels V., Vanzovichs E. The Technical and Economic Efficiency of Using Conductors with Composite Core in the Transmission Grid// Proceedings of the 9th International Conference on the European Energy Market EEM12. - Florence, Italy: IEEE, 2012. - 7. p.
42. Berjozkina S., Sauhats A., Banga A., Jakusevics I. Testing Thermal Rating Methods for the Overhead High Voltage Line// Proceedings of the 12th International Conference on Environment and Electrical Engineering IEEEIC 2013. - Wroclaw, Poland: IEEE, 2013. - pp. 215-220.
43. Beryozkina S., Sauhats A., Neimane V. Designing a Transmission Line Using Pareto Approach// Proceedings of the IEEE PES Grenoble PowerTech 2013 Conference. - Grenoble, France: IEEE PES, 2013. - 6. p.
44. Berjozkina S., Sauhats A. Review of Advanced Transmission Technologies towards the Smart Grid// Digest Book and Electronic Proceedings of the 54th International Scientific Conference of Riga Technical University. - Riga, Latvia: RTU, 2013. - 6. p.
45. Bockarjova M., Andersson G. Transmission line conductor temperature impact on state estimation accuracy // Proceedings of the IEEE Lausanne PowerTech 2007 Conference. - Lausanne, Switzerland: IEEE, 2007. - pp. 701-706.
46. Bare aluminum electrical conductors. Home page of "Sural" products / Internets. - <http://www.sural.com/products/bare/acsr.htm>
47. Buijs P., Bekaert D., Cole S., D. Van Hertem, Belmans R. Transmission investment problems in Europe: going beyond standard solutions, Energy Policy, 2011 / Internets. - https://lirias.kuleuven.be/bitstream/123456789/297751/1/ener_pol_pbuijs_et_al_2011.pdf
48. Bloomberg New Energy Finance. Energy Smart Technologies Leadership Forum Keynote Speech, October 2010, 22. p.
49. Cooperative games: core and Shapley value / Internets. - http://www.brown.edu/Departments/Economics/Papers/2007/2007-11_paper.pdf
50. CENELEC EN 50341-1/A1 standard. Overhead electrical lines exceeding AC 45 kV – Part. 1: General requirements – common specifications, 2009.
51. Chang W.S., Zinn C.D. Minimization of the cost of an electrical transmission line system// IEEE Trans. PAS. - 1976. - Vol.95 (No.4). - pp. 1091-1098.
52. Clairmont B. EPRI Project Overview. Evaluation of Instrumentation and Dynamic Thermal Ratings for Overhead Lines. In Advanced Energy Conf., Buffalo, 2011.
53. CTC global / Internets. - <http://www.ctccable.com/>
54. Cross-border trade in electricity and the development of renewables-based electric power: lessons from Europe, OECD trade and environment paper No. 2013/02 (JT03337016) by Heymi Bahar and Jehan Sauvage / Internets. - [http://search.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=COM/TAD/ENV/JWPTE\(2012\)20/FINAL&docLanguage=En](http://search.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=COM/TAD/ENV/JWPTE(2012)20/FINAL&docLanguage=En)
55. Cross-border cooperation between Russian and the European Union in the electricity sector: key trends and prospects / Internets. - <http://www.eurelectric.org/media/66573/SELIVERSTOV.pdf>
56. CIGRE Study Committee 22 - Working group 12. Technical Brochure 207-Thermal Behaviour of Overhead Conductors, August 2002.

57. Chapter 2: Enhancing the Transmission Network and System Operations / Internets. - http://mitei.mit.edu/system/files/Electric_Grid_2_Enhancing_Transmission_Network_System_Operations.pdf
58. Dale A. Douglass. Practical application of High-Temperature Low-Sag (HTLS) Transmission Conductors. - Connecticut: New Haven, 2004. - p. 53.
59. Dino A. and Ketley A. Dynamic transmission line rating: Technology review Tech. Rep. 208478-CR-001, Hydro Tasmania Consulting, 2009.
60. Ekonomou L., Iracleous D. P., Gonos I. F., Stathopoulos I. A. An optimal design method for improving the lightning performance of overhead high voltage transmission lines// Electric Power Systems Research. - 2006. - Vol. 76. - pp. 493-499.
61. Ekonomou L., Fotis G. P., Maris T. I. Cost related optimum design method for overhead high voltage transmission lines// Euro, Trans. Electr. Power. - 2008. - Vol.18. - pp. 437-447.
62. Europacable. An Introduction to High Voltage Direct Current (HVDC) Underground Cables, Brussels, October 2011.
63. FACTS technology for open access. CIGRE JWG 14/37/38/39-24. Final draft report, August 2000.
64. Flir systems, ThermaCAMTM P65, User's manual / Internets. - <http://www.alpinecomponents.co.uk/files/manuals-downloads/FLIR-P65-Manual.pdf>
65. Fülöp J. Introduction to Decision Making Methods / Internets. - <http://academic.evergreen.edu/projects/bdei/documents/decisionmakingmethods.pdf>
66. Grant I.S., Clayton R.E. Transmission line optimization// IEEE Trans. Power Deliv. - 1987. - Vol.2 (No.2). - pp. 520-526.
67. Geert E.V. Increased Uncertainty a New Challenge for Power System Planners// IEE Colloquium. - 1998. - Digest No. 200. - pp. 1831-1837.
68. Gorur R., Mobasher B., Olsen R. Characterization of Composite Cores for High Temperature-Low Sag (HTLS) conductors. Final project report. PSERC Publication 09-05, 2009, p. 52.
69. Grimaldi R., Pirovano G. UP-rating 150kV overhead lines with heat-resistant conductors// Proceedings of 18th International Conference on Electricity Distribution. - Turin, Italy: CIRED, 2005. - 4. p.
70. Global transmission report / Internets. - http://www.globaltransmission.info/archive_main.php?id=18#4
71. Gabrovsek M., Lovrencic V. Temperature monitoring of overhead lines (OHL) is Smart Grid solution for power grid// Proceedings of SIBIU Conf., 2010, pp. 1-8.
72. Hertzog C. Smart Grid Dictionary plus. - USA: Cengage Learning, 2011. - 272 p.
73. Hill T. The benefits of using high-temperature low-sag (HTLS) overhead conductors// 24th AMEU technical convention. - 2013. - pp. 53-55.
74. Hauer J., Overbye T., Dagle J., Widergren S. Advanced Transmission Technologies, National Transmission Grid Study / Internets. - <http://certs.lbl.gov/ntgs/issue-6.pdf>
75. Hart G. D., Uy D., Gharpure V., Novosel D., Karlsson D., Kaba M. PMUs – A new approach to power network monitoring, ABB Review 1, 2001, pp. 58 – 61.
76. ICNIRP Guidelines / Internets. - <http://www.icnirp.de/documents/emfgdl.pdf>
77. International activities, BRELL / Internets. - <http://www.litgrid.eu/index.php/about-us/international-activities-/621>
78. ICF Consulting. Unit Costs of constructing new transmission assets at 380kV within the European Union, Norway and Switzerland, Final Report, 2002 / Internets. - http://ec.europa.eu/energy/electricity/publications/doc/comp_cost_380kV_en.pdf

79. International energy statics / Internets. -
<http://www.eia.gov/cfapps/ipdbproject/IEDIndex3.cfm?tid=2&pid=2&aid=2>
80. Karimi Madahi S. S., Hassani M. Optimal design of insulators of using Artificial Neural Network (ANN) // Journal of Basic and Applied Scientific Research. - 2012. - Vol. 2 (1). - pp. 60-64
81. King Fahd University of Petroleum and Minerals: Chapter 7 Net Present Value and Other Investment Criteria / Internets. -
<http://faculty.kfupm.edu.sa/FINEC/mfaraj/fin301/notes/Ch7.pdf>
82. Kennon R.E., Douglass D.A. EHV transmission line design opportunities for cost reduction // IEEE Trans. Power Deliv. - 1990. - Vol.5 (No.2). - pp. 1145-1152.
83. Kiessling F., Nefzger P., Nolasco J.F., Kaintzyk U. Overhead Power Lines Planning, Design, Construction. - Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, 2003. - 759 p.
84. Kamboj S., Dahiya R. Application of GPS for Sag Measurement of Overhead Power Transmission Line // International Journal on Electrical Engineering and Informatics. - 2011. - Vol.3 (No.3). - pp. 268-277.
85. Kestrel 4000 Weather Meter / Internets. -
<http://kestrelmeters.com/products/kestrel-4000-weather-meter>
86. Koch H., Gas Insulated Transmission Lines (GIL). - Wiley: New Delhi, 2012. - 384 p.
87. Lebesgue-Stieltjes integrāls / Internets. -
<http://www.math.sunysb.edu/~daryl/ls.pdf>
88. Larruskain D.M., Zamora I., Abarrategui O., Iraolagoitia A., Gutiérrez M. D., E. Loroño and F. De la Bodega. Power transmission capacity upgrade of overhead lines / Internets. -
http://www.icrepq.com/icrepq06/296_Larruskain.pdf
89. Lauby M. G., Rollison E. Bulk power system integration of Smart Grid reliability considerations / Internets. -
http://www.ece.cmu.edu/~electricconf/2011/pdfs/Paper_Rollison.pdf
90. Lloyd Shapley's Matching and Game Theory / Internets. -
<http://www.econ.brown.edu/faculty/serrano/pdfs/ForthcomingSJE.pdf>
91. Miranda V., Proenca L. M. Probabilistic choice vs. risk analysis-conflicts and synthesis in power system planning // IEEE Transactions on Power Systems. -1998. - Vol.13 (3). - pp. 1038-1043.
92. Moshkin I., Berjozkina S., Sauhats A. Solving of Transmission Network Development Tasks in Market and Uncertainty Conditions // Proceedings of the 9th International Conference on the European Energy Market EEM12. - Florence, Italy: IEEE, 2012. - 7. p.
93. Migliavacca G (ed.). Advanced Technologies for Future Transmission Grids. -London: Springer-Verlag, 2013. - 396 p.
94. Morris H de Groot. Optimal Statistical Decisions. - McGraw-Hill, 1970. - 489 p.
95. Nogales S. C., Miñana J. A. L., Alonso A., Comech M. P., García-Gracia M., Martín E. HTLS and HVDC solutions for overhead lines uprating / Internets. -
<http://www.aedie.org/11chlie-papers/187-Cascante.pdf>
96. Neimane V. On development planning of electricity distribution networks. Ph.D. thesis, Royal Inst. Of Technology, Stockholm, Sweden, 2001.
97. Neimane V. Towards Bayesian Solution for Network Planning Problem // RIMAPS. - Porto, Portugal: 2001.
98. Overhead electrical conductors - Calculation methods for stranded bare conductors, IEC 1597.
99. Optics calculator / Internets. - <http://www.optris.com/optics-calculator>

100. Osborne M. J., Publicly-available solutions for an introduction to game theory, University of Toronto, 2004 / Internets. - <http://cramton.umd.edu/econ414/osborne-public-solutions.pdf>
101. Pareto V. Cours D'Economie Politique, Vol. I and II. F. Rouge, Lausanne, 1896.
102. Petrichenko L., Sauhats A., Guseva S., Berjozkina S., Neimane V. The stochastic approach for determination of transmission line wire cross section// Proceedings of the 2014 International Conference on Circuits, Systems, and Control. - Interlaken, Switzerland: EUROPMENT, 2014. - 7. p. (*raksts pieņemts publicēšanai*)
103. Pytlak P., Musilek P. Selective upgrading of transmission lines using DTCR// Proceedings of 25th IEEE Canadian Conf. on Electrical and Computer Engineering (CCECE). - Canada, 2012. - pp. 1-4.
104. PLS-CADD™ (Power Line Systems - Computer Aided Design and Drafting) / Internets. - http://www.powline.com/products/pls_cadd.html
105. Ren L., Jiang X., Sheng G., BO W. Design and calculation method for Dynamic Increasing Transmission Line Capacity// WSEAS Transactions on Circuits and Systems. - 2008. - Vol.7 (5). - pp. 348-357.
106. REALISEGRID, Research, methodologies and technologies for the effective development of pan-European key grid infrastructures to support the achievement of reliable, competitive and sustainable electricity supply, Project no.: 219123 / Internets. - http://realisegrid.rse-web.it/content/files/File/Publications%20and%20results/Deliverable_REALISEGRID_3.6.2.pdf
107. Saied M.M., Jaboori M., El-Nakid D. On the optimal design of high voltage overhead transmission lines// J. Electr. Mach. Power Syst. - 1990. - Vol.18 (No.3). - pp. 293-312.
108. Silverstein A. NCEP Transmission Technologies Workshop, 2011 / Internets. - <http://www.naruc.org/grants/Documents/Silverstein%20NCEP%20T-101%200420111.pdf>
109. Standard for Calculation the Current-Temperature Relationship of Bare Overhead Conductors, IEEE Std. 738-2006 (revision of IEEE Std. 738-1993).
110. SAPR LEP Russian CAD / Internets. - http://rubius.com/en/software_distribution/russian_cad/
111. Submarine cable review, Appendix 8 / Internets. - http://www.contactenergy.co.nz/web/pdf/our_projects/waikatowindfarm/june2008/R02_HMR_Transmission_System_Consideration_of_Alternative_Appendix8.pdf
112. Visweswara Rao G. Optimum designs for transmission line towers// Computers & Structures. - 1995. - Vol. 57 (No.1). - pp. 81-92.
113. Vanzovichs E., Aristovs T., Berjozkina S. Allowable Load Current Calculation Method with Heating Limitation for Overhead Powerlines// Abstract Book and Electronic Proceedings of the 51st Annual International Scientific Conference of Riga Technical University. - Riga, Latvia: RTU, 2010. - pp. 47-52.
114. Welcome to HTLS conductor. OHM TEKMIN / Internets. - http://www.ohmtekmin.com/nuevo/documento/HTLSC_STACIR_Rev1.pdf
115. Western area power administration, Upper Great Plains Region, Transmission System Planning. Transmission Enhancement Technology Report, July 2002.
116. Zima-Bocīkarjova M., Matevosyan J., Zima M., Soīder L. Sharing of Profit from Coordinated Operation Planning and Bidding of Hydro and Wind Power// IEEE Trans. on Power Systems. - 2010. - Vol.25 (No.3). - pp. 1663-1673.
117. Арион В.Д., Журавлев В.Г. Применение динамического программирования к задачам электроэнергетики. - Кишинев: Штиинца, 1981. - 132 с.

118. Александров Г.Н. Режимы работы воздушных линий электропередачи. - Санкт-Петербург: Второе издание Центра подготовки кадров энергетики, 2006. - 139 с.
119. Александров Г.Н. Установки сверхвысокого напряжения и охрана окружающей среды. - Ленинград: Энергоатомиздат, 1989. - 360 с.
120. Автоматизация и ИТ в энергетике: Новые возможности интеллектуальных систем противоаварийной автоматики для распределительных систем сетей 110 кВ / Internets. - <http://engineering.optima.ru/press-center/writes-about-us/1347/>
121. Бошнякович А.Д. Механический расчет проводов и тросов линий электропередачи. - Москва: Госэнергоиздат, 1962. - 254 с.
122. Беллман Р. Динамическое программирование. - Москва: Изд-во иностранной литературы. - 1960. - 400 с.
123. Брухис Г.Л., Воронин В.А., Илюшин П.В., Горшкова Н.А. Разработка и внедрение устройств автоматического ограничения перегрузки линий// Электрические станции. - 2012. - №6. - 36-42. с.
124. Вариводов В. Н. Новые технологии для российских энергетических компаний// Энергосбережение. - 2008. - №4. - 8 с.
125. Ваякин А. PLS-CADD как САПР для проектирования линий электропередачи / Internets. - <http://opten.ru/cntnt/rus/publikacii/165.html>
126. Влияние воздушных линий на экологию / Internets. - <http://pdomagos.ru/post-user/1125>
127. Глазунов А.А., Глазунов А.А. Основы проектирования воздушных линий электропередачи. Работа и расчет деревянных опор. - Москва: Госэнергоиздат, 1959. - 240 с.
128. Гибкие системы передачи переменного тока как физическая основа умных сетей / Internets. - <http://energyfuture.ru/facts-flexible-alternative-current-transmission-systems-gibkie-sistemy-peredachi-peremennogo-toka-kak-fizicheskaya-osnova-umnyx-setej>
129. Долгополов А.Г., Кондратенко Д.В., Уколов С.В., Постолатий В.М. Управляемые шунтирующие реакторы для электрических сетей// Проблемы региональной энергетики. – 2011. - №3. – 21 с.
130. Зуев Э.Н. Техника передачи электроэнергии: проблемы развития (Аналитический обзор)// Кабель-news. - 2010. - №4. - 13 с.
131. Интеллектуальная система мониторинга линий электропередач Конкорд / Internets. - <http://www.energo-bit.ru/>
132. Карапетян И. Г., Файбисович Д. Л., Шапиро И. М.. Справочник по проектированию электрических сетей / Под редакцией Д. Л. Файбисовича. - Москва: НЦ ЭНАС, 2006. - 320 с.
133. Конструктивные параметры ЛЭП / Internets. - http://ukrprovod.com.ua/useful_info/konstruktivnye-parametry-lep
134. Корба П., Ларссон М., Удалов А., Прайсс О. Взгляд в будущее. Перспективы управления энергосистемами// АББ Ревю. - 2005. - №2. - 35 - 38 с.
135. Куро Ж. Современные технологии повышения качества электроэнергии при ее передаче и распределения// Новости электротехники. – 2005. - №1 (31). - 13 с.
136. Лазарева Л.Д., Локтионов В.И. Принятие инвестиционных решений в энергетике с использованием метода сценарного анализа// Известия Иркутской государственной экономической академии. - 2013. - №1. - 3 с.
137. Лопатников Л. И. Экономико-математический словарь: Словарь современной экономической науки. - Москва: Дело, 2003. - 520 с.

138. Методика расчета предельных токовых нагрузок по условиям нагрева проводов для действующих линий электропередач МТ 34-70-037-87, Москва, 1987 / Internets. - <http://www.gosthelp.ru/text/RD3420547Metodikarasheta.html>
139. Мисриханов М.Ш., Иостсон Ю.А., Рубцова Н.Б., Токарский А.Ю. Электромагнитные параметры воздушных линий электропередачи (ЭМП ВЛ). Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2006613744, 27.10.2006// Программы для ЭВМ, базы данных и топология интегральных микросхем. Официальный бюллетень федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и торговым знакам - № 1 (58) - М. - ФГУ ФИПС - 2007.
140. Новоклимов Д. Эстетизация опор ЛЭП, декоративные опоры ЛЭП, 2011 / Internets. - http://novoklimov.io.ua/s98299/estetizaciya_opor_lep
141. Некрасов А. Инструмент для профессионала// Электроэнергия. - 2012. - №2 (11). - 146-147. с.
142. Неклепаев Б.Н. Электрическая часть электростанций и подстанций. - Москва: Энергоатомиздат, 1986. - 640 с.
143. Ногин В.Д. Принятие решений при многих критериях. Учебно-методическое пособие. - Санкт-Петербург: ИУТАС, 2007. - 104 с.
144. Нудельман Г., Лисицын А., Дони Н., Палей Э. Микропроцессорные реле защиты. Новые перспективы или новые проблемы?// Новости электротехники. - 2006. - №1 (37). - 11 с.
145. Основы проектирования электрических сетей / Internets. - <http://electrolibrary.narod.ru/6/61.htm>
146. Правила устройства электроустановок (ПУЭ): все действующие разделы ПУЭ-6 и ПУЭ-7. 7-й выпуск. - Новосибирск: Сиб. унив. изд-во, 2007. - 854 с.
147. Практические рекомендации по оценке эффективности и разработке инвестиционных проектов и бизнес-планов в электроэнергетике (с типовыми примерами). - Москва: НИЦПИ, 1999.
148. Устройства последовательной и параллельной компенсации (FACTS) / Internets. - [http://wiki.energyinsight.ru/wiki/Устройства_последовательной_и_параллельной_компенсации_\(FACTS\)](http://wiki.energyinsight.ru/wiki/Устройства_последовательной_и_параллельной_компенсации_(FACTS))
149. Устройства FACTS – тяжелая артиллерия для умных сетей / Internets. - <http://energyland.info/analitic-show-64640>
150. Увеличение пропускной способности воздушных ЛЭП до 3 раз без замены или значительной реконструкции существующей инфраструктуры / Internets. - http://solutions.3mrussia.ru/wps/portal/3M/ru_RU/EMD_ACCR/ACCR_Home/ProductBenefits/FAQ/
151. Федин В.Т. Принятие решений при проектировании развития электроэнергетических систем. - Минск: УП «Технопринт», 2000. - 105 с.
152. Чичев С.И., Калинин В.Ф., Глинкин Е.И. Система контроля и управления электротехническим оборудованием подстанций. - Москва: Спектр, 2011. - 140 с.
153. Шерешевский Л.А. Применение систем телемеханики Siemens в энергетике// Автоматизация и ИТ в энергетике. - 2009. - №1. - 4-9. с.
154. Экологическое влияние воздушных линий электропередачи / Internets. - <http://electricalschool.info/main/vl/897-jekologicheskoe-vlijanie-vozdushnykh.html>